



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HANNA HAUTAMÄKI
YHDYSKUNTAJÄTEVEDEN ESIKÄSITTELY MIKROSIIVILÄLLÄ JA
EROTETUN LIETTEEN ANAEROBINEN KÄSITTELY

Diplomityö

Tarkastajat: professori Jukka Rintala
ja assistant professor Marika Kokko
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Teknis-luonnontieteellisen tiedekun-
nan tiedekuntaneuvoston kokouk-
sessa 30. elokuuta 2017

TIIVISTELMÄ

HANNA HAUTAMÄKI: Yhdyskuntajäteveden esikäsittely mikrosiivilällä ja erotetun lietteen anaerobinen käsittely

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 50 sivua

Elokuu 2017

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Vesi- ja jätehuoltotekniikka

Tarkastajat: professori Jukka Rintala, assistant professor Marika Kokko

Avainsanat: yhdyskuntajätevesi, primääriliete, mikrosiivilä, biokaasu

Jätevedenpuhdistuksen vaatimukset tiukentuvat ja samalla kaupunkien väkiluku kasvaa, mikä lisää kuormitusta jätevedenpuhdistamoilla. Tämä asettaa uusia haasteita jäteveden käsittelylle. Perinteisesti jäteveden esikäsittelynä on käytetty laskeutusta, jolla on pyritty poistamaan jäteveden kiintoainetta. Laskeutuksen rinnalle vaihtoehtoisena esikäsittelymuotona on noussut jäteveden esikäsittely mikrosiivilöinnillä. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko mikrosiivilöinnillä tehostaa jäteveden esikäsittelyä ja voidaanko mikrosiivilöinnillä syntyvästä lietteestä saada sen energiasisältö ja ravinteet laskeutettua lietettä paremmin käyttöön.

Mikrosiivilöintiä testattiin esikäsittelynä Nokian Kullaanvuoren jätevedenpuhdistamolla, missä käsitellään päivittäin keskimäärin 10 000 m³ yhdyskuntajätevettä. Koeajot tehtiin 7,5 m³/h virtaamalla, polymeereillä Flopam, C-492HMW ja C-493VP ja polymeeriannostuksilla 1 ja 2 g/m³. Kokeissa TSS-vähennä ilman polymeeriä oli 50 % ja COD-vähennä 25 %. Polymeereillä TSS-vähennä oli keskimäärin 57 ± 6 % ja COD-vähennä 36 ± 6 %. Nämä vastaavat laskeutuksella saatuja vähennyksiä. Ravinnevähennyksissä oli vaihtelua kokeiden aikana myös samoilla ajoparametreilla. Polymeerit tehostivat fosforin poistoa. Koeajojen lietteille tehtiin ravinneanalyysit- ja metaanintuottokokeet, minkä perusteella valittiin biokaasureaktorikokeisiin kontrollilietteeksi laskeutettu liete, ilman polymeeriä mikrosiivilöity liete sekä lietteet Flopam- ja C-492HMW polymeeriliäyksillä 2 g/m³ annostuksilla.

Reaktorikokeet tehtiin mesofiilisillä puolijatkuvatoimisilla täyssekoitteisilla reaktoreilla, joiden nestetilavuus oli 4 litraa. Reaktorien orgaaninen kuormitus oli 1,2-1,5 g VS/L/d ja viipymä 20 d. Reaktorien metaanintuotto oli tasaista alun hitaan pH:n laskun jälkeen. Metaanintuotot reaktoreissa olivat 372 ± 15 L/kg VS (laskeutettu liete), 333 ± 27 L/kg VS (mikrosiiviläliete), 406 ± 37 L/kg VS (Flopam:lla saostettu ja mikrosiivilöity liete) ja 411 ± 42 L/kg VS (C-492HMW:lla saostettu ja mikrosiivilöity liete).

Mikrosiivilöinnin käyttö laskeutuksen korvaajana on tämän tutkimuksen mukaan mahdollista, sillä kiintoainetta saatiin poistettua vastaavia määriä kuin laskeutuksella ja polymeeriliäyksen ansiosta mikrosiivilöintilietteen metaanintuotto oli 34-39 L CH₄/kg VS parempaa kuin laskeuttamalla.

ABSTRACT

HANNA HAUTAMÄKI: Primary treatment of municipal wastewater with microsieve and anaerobic treatment of the microsieved sludge

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 50 pages

August 2017

Master's Degree Program in Environmental and Energy Technology

Major: Water and Waste Management Technology

Examiners: Professor Jukka Rintala, Assistant Professor Marika Kokko

Keywords: municipal wastewater, primary sludge, microsieve, biogas

In recent years, the requirements for wastewater treatment have tightened and simultaneously the population in towns is growing which increases load in the wastewater treatment plants. This sets new challenges for wastewater treatment. Traditionally, settling has been used as primary treatment for wastewater to remove solid matter from wastewater. However, microsieving has started to use as an alternative primary treatment method for settling. The aim of this thesis is to find out if microsieving enhances wastewater primary treatment and if the energy content and nutrients can be better recovered from microsieved sludge than settled sludge.

Microsieving was tested as the primary treatment in Nokia Kullaanvuori wastewater treatment plant where on average of 10 000 m³ municipal wastewater is treated daily. Pilot runs were carried out with flow rate of 7,5 m³/h, with polymers Flopam, C-492HMW and C-493VP and with polymer dosings of 1 and 2 g/m³. TSS removal in the pilot runs without polymer was 50 % and COD removal 25 %. With polymers TSS removal was 57 ± 6 % and COD removal 36 ± 6 %. These removals are equivalent to removals with settling. Nutrient removals changed during the pilot runs even within the same run parameters. Polymers removed more phosphorus than runs which were done without polymers. Nutrient content and methane production potential of sludges were analysed. Sludges that were selected to the biogas reactor experiments were settled sludge as control, microsieved sludge without polymer adding and microsieved sludges with polymers Flopam and C-492HMW (polymer dosing of 2 g/m³).

Reactor experiments were carried out with mesophilic semi-continuous completely stirred-tank reactors whose liquid volume were 4 liters. Organic loading of the reactors was 1,2-1,5 g VS/L/d and hydraulic retention time 20 d. Methane production of the reactors was steady after slow pH drop in the beginning of the experiments. Methane productions of the reactors were 372 ± 15 L/kg VS (settled sludge), 333 ± 27 L/kg VS (microsieved sludge), 406 ± 37 L/kg VS (Flopam precipitated and microsieved sludge) and 411 ± 42 L/kg VS (C-492HMW precipitated and microsieved sludge).

According to this study, it seems that microsieving is a good alternative for settling since solid fraction can be removed with microsieving as efficiently as with settling and thanks to 34-39 L CH₄/kg VS more methane can be produced with polymer adding compared to settling.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on osa Ympäristöministeriön rahoittamaa ProRavinne-hanketta, joka on osa hallituksen kärkihankkeita. Hankkeen tarkoituksena on selvittää uusien yhdyskuntajäteveden esikäsittelyprosessien vaikutuksia jätevedenpuhdistamon lietteiden ominaisuuksiin, kuten ravinne- ja energiasisältöön sekä biokaasulaitoksessa tapahtuvaan ravinteiden tuotantoon ja käytettävyyteen.

Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat professori Jukka Rintala ja apulaisprofessori Marika Kokko. Haluan kiittää heitä kannustamisesta, ohjeista, avusta ja työn kommentoinnista. Kemira Oyj:lle kiitos jäteveden saostukseen käytettyjen polymeerien tarjoamisesta. Haluan kiittää myös reaktoreiden teknisten haasteiden ratkomisessa auttanutta Antti Nuottajärveä. Kiitos Petri Nissiselle yhteistyöstä mikrosiiviläköiden tekemisessä ja avusta reaktorien kanssa. Leena Ojaselle ja Linda Parkkiselle kiitos henkisestä tuesta ja avusta laboratoriossa. Suuri kiitos myös perheelleni ja ystävilleni, jotka ovat aina tsempanneet minua eteenpäin elämässä ja opinnoissa.

Tampereella 24.10.2017

Hanna Hautamäki

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	YHDYSKUNTAJÄTEVESI.....	3
2.1	Yhdyskuntajäteveden koostumus.....	3
2.2	Yhdyskuntajäteveden kiintoaine	4
3.	YHDYSKUNTAJÄTEVEDEN ESIKÄSITTELY	6
3.1	Esiselkeytys laskeutuksella	6
3.2	Laskeutuksen tehostaminen polymeereillä.....	7
3.3	Mikrosiivilä esiselkeytyksessä	9
3.3.1	Mikrosiivilöinnin periaate.....	9
3.3.2	Nauhasiivilän toiminta	10
3.3.3	Mikrosiivilöinti esikäsittelymenetelmänä	11
3.3.4	Mikrosiivilöinnin edut laskeutukseen verrattuna.....	15
4.	LIETTEIDEN KÄSITTELY BIOKAASUPROSESSISSA	17
4.1	Orgaanisen aineen anaerobinen hajoaminen	17
4.2	Lietteiden biokaasuntuottopotentiaali	18
5.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO.....	20
5.1	Kohdepuhdistamo.....	20
5.2	Polymeerikokeet.....	20
5.3	Koeajot mikrosiivilällä.....	21
5.3.1	Koelaitteisto	21
5.3.2	Koeajot	22
5.4	Reaktorikokeet	23
5.5	Näytteenotto reaktoreista ja analyysimenetelmät.....	24
6.	TULOKSET	26
6.1	Polymeerin valinta mikrosiiviläajoihin	26
6.2	Mikrosiivilöinnin massataseet.....	27
6.3	Mikrosiivilällä erotettujen lietteiden ominaisuudet.....	30
6.4	Biokaasureaktorikokeiden tulokset	33
6.4.1	Metaanintuotto	34
6.4.2	Orgaanisen aineen vähenemä.....	36
6.4.3	Reaktori 2:n jälkimetaanintuotto.....	38
7.	TULOSTEN TARKASTELU	39
7.1	Orgaanisen aineen poisto mikrosiivilällä	39
7.2	Biokaasureaktorikokeet.....	42
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET	45
	LÄHTEET	46

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BOD	biologinen hapenkulutus, <i>biological oxygen demand</i>
CEPT	esikäsittelyn tehostaminen kemikaaleilla, <i>chemically enhanced primary treatment</i>
COD	kemiallinen hapenkulutus, <i>chemical oxygen demand</i>
CSTR	Puolijatkuvatoiminen täyssekoitteinen tankkireaktori, <i>continuous stirred-tank reactor</i>
HP-PACl	Uudella syntetisointimenetelmällä valmistettu polyammoniumkloridi
ICP-OES	<i>Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry</i>
MBBR	liikkuvan kantoaineen reaktori, <i>moving bed biofilm reactor</i>
NH ₄ -N	ammoniumtyppi
ON	orgaaninen typpi, <i>organic nitrogen</i>
PACl	polyammoniumkloridi
PO ₄ -P	fosfaatti
sCOD	liukoinen kemiallinen hapenkulutus, <i>soluble chemical oxygen demand</i>
TKN	kokonaistyyppi, <i>total Kjeldahl nitrogen</i>
TP	kokonaisfosfori, <i>total phosphorus</i>
TS	kiintoaine, <i>total solids</i>
TSS	suspendoitunut kiintoaine, <i>total suspended solids</i>
VFA	haihtuvat rasvahapot, <i>volatile fatty acids</i>
VS	hehkutushäviö, <i>volatile solids</i>
VSS	suspendoitunut orgaaninen kiintoaine, <i>volatile suspended solids</i>

1. JOHDANTO

Yhdyskuntajätevedet koostuvat kotitalouksissa, teollisuudessa ja palveluissa syntyvistä jätevesistä, jotka puhdistetaan jätevedenpuhdistamolla. Jätevedenpuhdistuksen ensimmäinen vaihe on esikäsittely, jonka tavoitteena on poistaa kiintoainetta sekä kiinteässä muodossa olevaa orgaanista ainetta ja ravinteita ennen seuraavia käsittelyprosesseja ja näin vähentää niiden kuormitusta. Perinteisesti jäteveden esikäsittelynä on käytetty laskeutusta. Laskeutuksessa kiintoaine erottuu laskeutusaltaan pohjalle painovoiman vaikutuksesta. (Metcalf & Eddy 2014)

Viimeisen reilun vuosikymmenen aikana mikrosiivilää on tutkittu vaihtoehtoisena yhdyskuntajäteveden esikäsittelymenetelmänä (Rusten & Ødegaard 2006; Paulsrud et al. 2014; Franchi & Santoro 2015; Väänänen et al. 2016). Mikrosiivilöinnissä jätevesi tulee vedenottokammioon, jossa on liikkuva viira. Osa tulevasta vedestä siivilöityy viiran huokosten läpi ja viiran pinnalle pidättynyt kiintoaine putoaa viiran yläpäästä lietekouruun. (Franchi & Santoro 2015) Mikrosiivilöintiä käyttämällä on päästy vastaaviin kiintoaineen ja orgaanisen aineen vähenemiin kuin esiselkeytyksellä. (Rössle & Pretorius 2001; Ramadori et al. 2005; Rusten & Ødegaard 2006; Metcalf & Eddy 2014). Parhaimmillaan mikrosiivilöinnillä voidaan säästää energiaa laskeutukseen verrattuna ja saavuttaa myös laskeutusta korkeampia kiintoaineen ja orgaanisen aineen vähenemisiä. (Rusten & Ødegaard 2006; Razafimanantsoa et al. 2014)

Esikäsittelyssä syntyy primäärilietettä, joka voidaan jatkokäsitellä esimerkiksi anaerobisessa biokaasuprosessissa. (Metcalf & Eddy 2014) Primääriliete voidaan käsitellä anaerobisessa prosessissa, missä lietteen energiasisältö voidaan muuttaa biokaasuksi. Anaerobinen käsittely vähentää myös lietteen hajua ja patogeenejä. Prosessissa syntyvä mädäte voidaan hyödyntää lannoitteena, sen sisältämän typen ja fosforin ansiosta. (Wellinger et al. 2013) Mikrosiivilällä erotetun lietteen biokaasuntuottoa on tutkittu ja vertailtu laskeutetun lietteen kaasuntuottoon. Tulosten perusteella mikrosiivilälietteen metaanintuotto saattaa ylittää laskeutetun lietteen metaanintuoton. (Paulsrud et al. 2014)

Tämä diplomityö keskittyy mikrosiivilöintiin yhdyskuntajäteveden esikäsittelymenetelmänä. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää mikrosiivilöinnin soveltuvuutta yhdyskuntaveden esikäsittelyyn ja voidaanko mikrosiivilöinnillä saavuttaa etuja perinteiseen laskeutukseen verrattuna. Mikrosiivilöinnin kiintoainevähenemää sekä biokaasun tuottoa tutkitaan ja verrataan perinteiseen laskeutettuun lietteeseen. Tarkoitus on selvittää ovatko kiintoaineen, orgaanisen aineen ja ravinteiden vähenemät korkeampia ja tuottaako mikrosiivilöity liete enemmän biokaasua kuin laskeutettu liete. Kokeissa tutkitaan myös polymeerilisäyksen vaikutusta mikrosiivilöintiin ja biokaasun tuottoon.

Diplomityön teoriaosuuden ensimmäinen vaihe (luku 2) keskittyy yhdyskuntajäteveden koostumukseen ja sen sisältämään kiintoaineeseen. Seuraavaksi (luku 3) käsitellään yhdyskuntajäteveden esikäsittelyä perinteisellä laskeutuksella sekä vaihtoehtoisella menetelmällä, mikrosiivilöinnillä. Esiselkeytyksessä syntyvien lietteiden biokaasuntuottoominaisuuksia esitellään seuraavaksi (luku 4). Teoriaosuuden jälkeen esitellään koepuhdistamo, käytetty mikrosiivilä, ajoparametrit ja biokaasukokeiden toteutus sekä menetelmät (luku 5). Tämän jälkeen kerätään yhteen mikrosiivilä- ja biokaasuntuottokokeiden tulokset (luku 6). Lopuksi on tulosten tarkastelu (luku 7) ja johtopäätökset (luku 8).

2. YHDYSKUNTAJÄTEVESI

Esikäsittely poistaa suurimman osan jäteveden kiintoaineesta ennen seuraavia käsittelyvaihteita. Jäteveden kiintoaine koostuu erilaisista epäorgaanista ja orgaanisista yhdisteistä ja lisäksi siinä on typpeä ja fosforia. Kiintoaineen poistoa voidaan tehostaa kemikaalilisäyksellä. (Metcalf & Eddy 2014) Poistettu kiintoaine erottuu lietteenä, jota voidaan jatkokäsitellä, minkä takia sen koostumuksen tunteminen on tärkeää.

2.1 Yhdyskuntajäteveden koostumus

Kotitalouksien jätevesi koostuu WC-jätevesistä ja harmaista vesistä, joihin kuuluu vedet suihkusta, kylpyammeesta ja käsienvesualtaasta sekä keittiöaltaasta, tiskikoneesta ja pesukoneesta (Larsen et al. 2013). Kotitalousvedenkulutus Suomessa on keskimäärin 155 L/hlö/d (Virta & Pylsy 2011). Vanhoissa jätevesiverkostoissa viemäriverkostoon voi kulkeutua myös valumavesiä (Sincero & Sincero 2003). Myös teollisuuden ja palvelujen kuten koulujen jätevesiä johdetaan jätevedenpuhdistamolle. Teollisuuden jätevesien koostumus vaihtelee suuresti teollisuuden alasta riippuen ja se voi vaatia esikäsittelyä ennen jätevedenpuhdistamolle johtamista (Metcalf & Eddy 2014) Yhdyskuntajäteveden koostumus on esitetty Taulukossa 1.

Taulukko 1. Keskimääräiset jäteveden ominaisuudet muutamilla Pohjoismaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Keskihajonnat ovat suluissa, jos ne on ilmoitettu tutkimuksessa.

Jätevesi	Lund, Ruotsi ^a	Kööpenhamina, Tanska ^b	Lempäälä, Suomi ^c	ka
TSS (mg/L)	534 (173)	261	386	394
COD (mg/L)	712 (225)	529	e.i.	621
sCOD (mg/L)	82 (29)	e.i.	e.i.	e.i.
BOD ₇ (mg/L)	e.i.	204	223	214
Kokonaistyyppi, TKN (mg/L)	59 (8)	50	55	55
Ammoniumtyppi, NH ₄ ⁺ (mg/L)	31 (9)	36	e.i.	33
Orgaaninen typpi, ON (mg/L)	e.i.	e.i.	e.i.	e.i.
Kokonaisfosfori (mg/L)	14 (5)	8	10	11

e.i.: ei ilmoitettu, a (Väänänen et al. 2016), b (Yoshida et al. 2015), c (FCG 2011), Lempäälän ja Kööpenhaminan kuormitukset ovat vuosikeskiarvoja, Lundin kuormitusten määrittämiseksi on otettu 4-73 näytettä.

Jäteveden koostumus vaihtelee kuitenkin huomattavasti riippuen ajasta, päivästä ja vuodenajasta. Kotitalouksien vedenkäyttö vaihtelee vuorokauden ajan mukaan. Teollisuuden

virtaamat ja jäteveden pitoisuudet vaihtelevat esimerkiksi, kun laitteita pestään tai alajetaan. Myös vuodenajalla on merkitystä jäteveden määrään ja pitoisuuksiin, kun sadekausina ja sulamisveden aikaan vesimäärät kasvavat ja pitoisuudet laimenevat. (Metcalf & Eddy 2014)

Lisäksi jätevesien koostumukseen jätevedenpuhdistamolla vaikuttaa viemäröintijärjestelmä. Viemäreiden tyypistä ja pituudesta riippuen jäteveden koostumus muuttuu ennen puhdistamolle saapumista. Laakeilla alueilla jätevesi virtaa hitaasti ja tarvitaan erillisiä jäteveden pumppaamoita. (Ødegaard 1998) Putkistojen seiniin tarttuu mikrobeja ja syntyy anaerobiset olosuhteet, jolloin muodostuu helposti hajoavaa orgaanista ainesta (Rudelle et al. 2011). Mäkisessä maastossa olosuhteet ovat päinvastaiset, kun turbulenssin vaikutuksesta jätevetteen sitoutuu happea. Putkistojen pinnalle tarttuvat mikrobit muodostavat jätevetteen biomassaa, joka on hitaasti biohajoavaa. (Ødegaard 1998)

2.2 Yhdyskuntajäteveden kiintoaine

Keskimääräisen jäteveden kiintoainepitoisuus on 806 mg/L, mutta se voi olla jopa 1600 mg/L (Metcalf & Eddy 2014). Tutkijat määrittelevät liukoisen ja kiintoaineen rajakoon eri tavoilla (Sophonsiri & Morgenroth 2004; Metcalf & Eddy 2014). Lähteestä riippuen molekyylikooltaan alle 0,001 µm, 0,08 µm tai 0,1 µm partikkeleita pidetään liukoisina (Hu et al. 2002; Nieuwenhuijzen 2002; Sophonsiri & Morgenroth 2004). Merkittävä osa jäteveden kiintoaineesta on orgaanista ainesta (Nieuwenhuijzen et al. 2004; Sophonsiri & Morgenroth 2004). Proteiinien osuus orgaanisesta aineesta on 40-60 prosenttia, hiilihydraattien 25-50 prosenttia ja öljyn ja rasvojen osuus 8-12 prosenttia. (Metcalf & Eddy 2014)

Orgaanisen aineen pitoisuutta jätevedessä voidaan mitata biologisen hapenkulutuksen (BOD), kemiallisen hapenkulutuksen (COD) ja orgaanisen kokonaishiilen (TOC) avulla. (Metcalf & Eddy 2014) COD koostuu liukoisesta ja kiinteästä fraktiosta. Kiinteästä COD:sta osa on biohajoavaa ja osa biohajoamatonta. Kiinteän COD:n biohajoaminen on liukoista COD:ta hitaampaa, sillä bakteerit liuottavat ensin kiinteän aineen solujen ulkopuolisten entsyymien avulla. (Metcalf & Eddy 2014) Biohajoavaan kiintoaineeseen voidaan laskea mukaan myös biomassa-COD (Pasztor et al. 2009). Kiintoaineesta biologisesti hajoavan COD:n osuus kokonais-COD:sta on keskimäärin 44 % ja hajoamattoman 23 % (Taulukko 2). Hollannissa jäteveden kiinteän biohajoamattoman COD:n osuus oli suurempi kuin muissa maissa. Mahdollinen syy tälle on jätevesien pitkät viipymät viemäriverkostossa. Biohajoava fraktio ehtii hajota verkostossa, mikä lisää hajoamattoman fraktion suhteellista osuutta puhdistamolle saapuvassa jätevedessä. (Pasztor et al. 2009)

Taulukko 2. COD-fraktioiden osuudet (%) yhdyskuntajäteveden kokonais-COD:sta muutamissa Euroopan maissa. Keskihajonta suluissa.

Puhdistamon maa	COD (mg/L)	liukoinen hajoamaton	liukoinen hajoava	kiinteä hajoamaton	kiinteä hajoava
Unkari ^a	774 (320)	5 (3)	22 (9)	24 (8)	50 (10)
Tanska ^b	379 (23)	8 (0,2)	21 (2)	13 (0,4)	58 (2)
Hollanti ^c	551 (148)	6 (2)	25 (11)	36 (14)	25 (13)
Ruotsi ^d	183	15	27	17	41
Keskiarvo		9	24	23	44

a (Pasztor et al. 2009) 24 tunnin kokoomanäyte, b (Gernaey & Jørgensen 2004) 2 näytettä otettu kuivalla kaudella, yksi sateella ja yksi myrskysäällä, c (Roeleveld & Loosdrecht 2002), d (Xu & Hultman 1996) primäärikäsittelyn jälkeinen jäteveden koostumus, 24 tunnin kokoomanäyte

Kokonaistyyppi (TKN) koostuu epäorgaanisesta ammoniumtypestä ja orgaanisesta tyypestä (Taulukko 3). Ammoniumtyypen olomuoto ammoniakki (NH_3) ja ammoniumionin (NH_4^+) välillä riippuu pH:sta ja lämpötilasta. Esimerkiksi lämpötilassa 25 °C ja pH:n ollessa alle 9,25 suurin osa ammoniumista on ionimuodossa. Orgaanisesta tyypestä osa on liukoista ja osa kiinteää. Sekä liukoisessa että kiinteässä fraktiossa on biohajoavaa ja biohajoamatonta tyyppiä. (Metcalf & Eddy 2014)

Taulukko 3. Tyypifraktioiden osuudet (%) yhdyskuntajäteveden kokonaistyypestä. (Rössle & Pretorius 2001)

	TKN	orgaaninen hajoamaton tyyppi	orgaaninen hajoava tyyppi	epäorgaaninen tyyppi
liukoinen	84	3	6	75
kiinteä	16	10	6	0

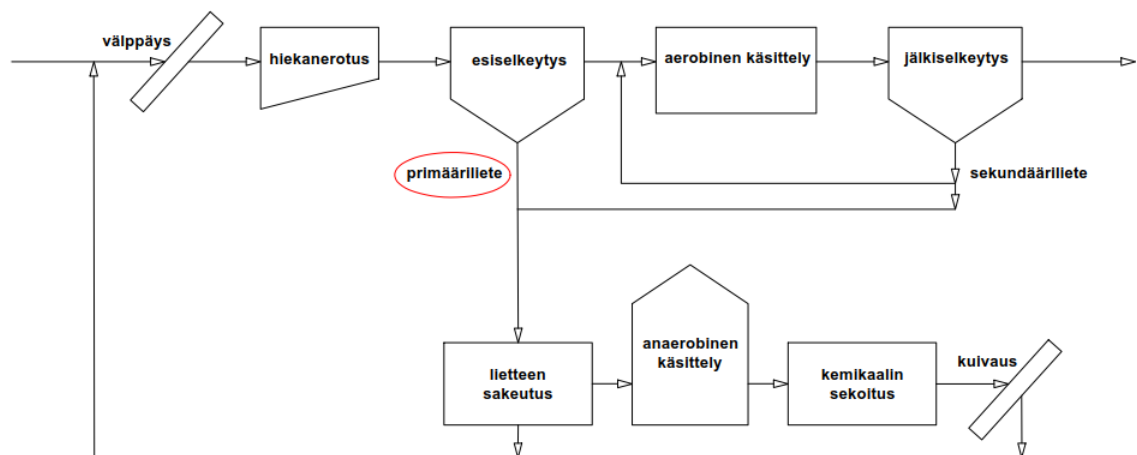
Fosfori voidaan jakaa orgaaniseen (noin 60 %) ja epäorgaaniseen fosforiin tai typen tapaan liukoiseen ja kiinteään fosforiin. Epäorgaaninen fosfori koostuu ortofosfaatista, mikä on helposti biohajoavaa ja polyfosfaatista, mikä hydrolysoituu hitaasti ennen kuin hajoaa reaktiiviseen ortofosfaattimuotoon. (Metcalf & Eddy 2014) Suurin osa liukoisesta fosforista on ortofosfaattina, mikä on helposti biohajoavaa. Kokonaisfosforista noin 36 % on kiintoaineena. (Nieuwenhuijzen et al. 2004)

3. YHDYSKUNTAJÄTEVEDEN ESIKÄSITTELY

Kaupungistumisen seurauksena jätevedenpuhdistamoiden kuormitus kasvaa. Tämä vaikeuttaa puhdistamoiden pääsyä esikäsittelyvaatimuksiin, jotka ovat vähintään 20 %:n biologisen hapenkulutuksen vähenemä ja 50 %:n kiintoainevähenemä (Yhdyskuntajätevesien käsittelyä koskeva direktiivi 1991). Puhdistusvaatimuksiin päästäkseen laitosten on usein tehtävä saneerauksia, mutta perinteinen esiselkeytyslaitosten rakentaminen vie paljon tilaa. Esiselkeytyslaitosten korvaajiksi onkin esitetty mikrosiivilöitä. (Väänänen 2017)

3.1 Esiselkeytys laskeutuksella

Esiselkeytys on yleisin jätevedenpuhdistamoilla käytetty esikäsittelymenetelmä ennen biologista käsittelyä (Kuva 1) (Paulsrud et al. 2014). Jätevesi johdetaan esiselkeytysaltaaseen, missä partikkelit vajoavat altaan pohjalle painovoiman vaikutuksesta.



Kuva 1. Jätevedenkäsittelyn vaiheet (Metcalf & Eddy 2014)

Painovoimainen laskeutuminen voi olla erillishiukkas-, flokkulentti-, vyöhyke- tai puristuslaskeutusta. Erillislaskautuksessa partikkelien välillä ei ole juurikaan vuorovaikutusta, vaan ne laskeutuvat nopeudella, joka riippuu niiden massasta. Flokkulentissa laskeutumisessa partikkelit yhdistyvät suuremmiksi partikkeleiksi, jolloin niiden massa ja laskeutumisnopeus kasvavat. Vyöhyke- ja puristuslaskeutumista tapahtuu prosesseissa, joissa on paljon suspendoitunutta kiintoainetta. Partikkelit laskeutuvat kerroksena, jossa ne ovat samassa asemassa toisiinsa nähden ja vesi pääsee virtaamaan niiden väleistä kerroksen yläpuolelle. Laskeutumisen jatkuessa pohjalle muodostuu puristusvyöhyke. (Metcalf & Eddy 2014)

Laskeutusaltaita on kahta perustyyppiä, suorakulmaisia ja pyöreitä. On kuitenkin myös lietepatjalaskeuttimia, joissa kierrätetään lietettä nopeamman laskeutumisen saavuttamiseksi sekä selkeyttimiä, joissa flokin laskeutumista helpotetaan mikrohiekan avulla. (Mackenzie 2010) Suorakulmaisissa vesi tulee sisään toisesta päästä ja poistuu toisesta. Pyöreissä selkeyttimissä jätevesi johdetaan selkeyttimeen sen pohjalta, ja se poistuu laidan yläosassa olevasta ylivuotokourusta. Osa kiintoaineesta laskeutuu altaan pohjalle, josta se kaavitaan lietetaskuihin. Sieltä liete pumpataan lietteen käsittelyyn. (Sincero & Sincero 2003) Näin muodostunutta lietettä kutsutaan primäärilietteeksi (Metcalf & Eddy 2014).

Esiselkeytyksellä vähennetään jäteveden kiintoainepitoisuutta (TS) ennen seuraavia käsittelyvaiheita. Hyvin toimiva esiselkeytys poistaa 50-70 % suspendoituneesta kiintoaineesta (TSS), 25-40 % biologisesta hapenkulutuksesta ja 30-40 % kemiallisesta hapenkulutuksesta. (Rössle & Pretorius 2001; Ramadori et al. 2005; Metcalf & Eddy 2014)

Laskeutus poistaa ainakin 50 % kiintoaineesta, jolloin tuestä poistuu noin 9 % ja fosforista 18 %, jos huomioidaan kuinka suuri määrä tuestä ja fosforista on kiintoainemuodossa. Ravinnepoistumisissa on vaihtelua (Taulukko 4), mutta kokonaisuudessaan ravinteiden vähenemät ovat pieniä (maksimissaan noin 10 %). Tämä on vähemmän kuin teoreettinen fosforin vähenemä. Mahdollinen syy tälle on ollut, että jäteveden kiinteän fosforin pitoisuus on ollut keskimääräistä jäteveden kiinteän fosforin pitoisuutta pienempi, jolloin laskeutuneen fosforin määrä on jäänyt myös pienemmäksi.

Taulukko 4. Laskeutuksella poistettuja ravinnemääriä eri puolilla maailmaa.

Puhdistamon maa	Jäteveden TP (mg/L)	TP-poisto (%)	Jäteveden TKN (mg/L)	TKN-poisto (%)	Jäteveden NH ₄ ⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ -poisto (%)
Turkki ^a	8,3	9	41	9	27	e.i.
Kiina ^b	e.i.	e.i.	e.i.	e.i.	17,1	4
Kiina ^c	e.i.	12	e.i.	12	e.i.	e.i.
Ranska ^d	e.i.	e.i.	55	-5	45	-11

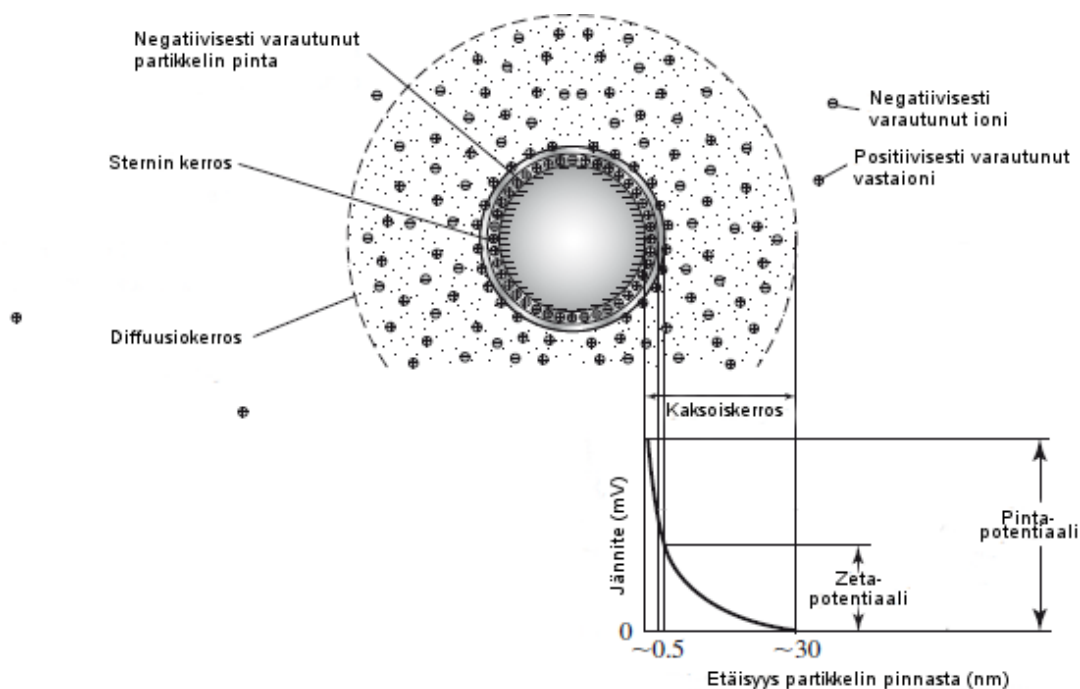
e.i.: ei ilmoitettu, a (Tas et al. 2009), b (Lin et al. 2017), c (Poon & Chu 1999), d (Jimenez et al. 2010)

Pelkällä yhdyskuntajäteveden laskeutuksella ei saavuteta lainsäädännön typelle ja fosforille asettamia vähimmäispoistotehovaatimuksia (70 ja 80 %) (Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 2006).

3.2 Laskeutuksen tehostaminen polymeereillä

Jätevedessä on kolloidisia partikkeleita, joihin painovoima vaikuttaa heikosti. Tämän takia kolloidisten partikkelien laskeuttamiseksi käytetään kemiallista koagulaatio-flokkulaatiota. Partikkelit ovat vedessä stabiilissa tilassa, jossa partikkelien väliset tilavuusvoimat

mat ovat pienempiä kuin sähkövarauksen aiheuttamat poistyöntävät voimat. Partikkeleihin vaikuttaa Brownin liike, jolloin ne ovat suspensiossa. Brownin liikkeessä kolloidiset partikkelit törmäilevät toisiinsa molekyylien lämpöliikkeestä johtuen. Vedessä olevat kolloidiset partikkelit ovat usein negatiivisesti varautuneita (Kuva 2). Negatiivisesti varautuneiden partikkelien pinnalle tarttuu vastaioneja, jolloin muodostuu kiinteä Sternin kerros. Tämän kiinteän kerroksen ympärillä on löyhempi kerros, jonka pintaa kutsutaan leikkauspinnaksi. Leikkauspinnalla olevaa potentiaalia kutsutaan zeta-potentiaaliksi. Leikkauspinnan ulkopuolella on diffuusiokerros, joka ei muodosta kiinteää kerrosta partikkelin pinnalle. (Metcalf & Eddy 2014)



Kuva 2. Negatiivisten kolloidipartikkelien pinnalle muodostuu vastaioneista ja varautuneesta diffuusiokerroksesta kaksoiskerros. Perustuu lähteeseen (Mackenzie L. D. 2010)

Jotta kolloidiset partikkelit saadaan kerääntymään yhteen isommiksi partikkeleiksi, tulee partikkelien varausta pienentää tai kumota. Kemiaallinen koagulaatio-flokkulaatio koostuu koagulaatiosta, jossa kolloidipartikkeleista tehdään epästabiileja, mikä mahdollistaa isompien partikkelien muodostumisen. Toisessa vaiheessa, flokkulaatiossa partikkelit kertyvät yhteen Brownin liikkeen, sekoituksen tai differentiaalisen laskeutuksen ansiosta. (Bratby 2006)

Polymeerit vähentävät diffuusiokerroksen paksuutta ja näin pienentävät zeta-potentiaalia. Tämä johtaa partikkelien epästabiiliuteen, minkä ansiosta partikkelit voivat kiinnittyä toisiinsa. Polymeerit voivat kiinnittää partikkeleita toisiinsa neutraloimalla partikkelien varausta, muodostamalla polymeerisiltoja tai näiden yhdistelmällä. Polymeerit voivat adsorboitua kolloidipartikkelien pintaan ja neutraloida näiden varausta eli ne toimivat

koagulanttina. Tällöin käytetään kationisia polymeerejä, sillä jäteveden kiintoainepartikkelit ovat useimmiten negatiivisesta varautuneita. Polymeerisiltoja muodostavat polymeerit ovat useimmiten anionisia tai kationisia. Korkean molekyyllipainon kationiset polyelektrolyytit pystyvät partikkelien neutraloinnin lisäksi muodostamaan siltoja niiden välille. (Bratby 2006)

Kemiallisella saostuksella typpivähenemät ovat alle 28 % mutta fosforin poistossa saavutetaan 76-92 %:n vähenemä (Taulukko 5). Fosforin vähenemä laskeutuskokeissa oli noin 87 %, kun laboratoriomittakaavassa typpivähenemä oli parhaimmillaan noin 30 %.

Taulukko 5. *Typpi- ja fosforivähenemät jätevesien kemiallisessa saostuksessa ja laskeutuksessa eri tutkimuksissa.*

Puhdistamon maa	Saostuskemikaali ja annostus	Jäteveden TP (mg/L)	TP-poisto (%)	Jäteveden TKN (mg/L)	TKN-poisto (%)	Jäteveden NH_4^+ (mg/L)	NH_4^+ -poisto (%)
Algeria ^a	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, 200 mg/L	9,9	78	e.i.	e.i.	e.i.	e.i.
Kiina ^b	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, 140 mg/L	5*	78	e.i.	e.i.	30	5
Algeria ^a	FeCl_3 , 200 mg/L	9,9	89	e.i.	e.i.	e.i.	e.i.
Japani ^c	FeCl_3 , 8 mg/L	6,3	85	34	28	e.i.	e.i.
Algeria ^a	$\text{Ca}(\text{OH})_2$, 500 mg/L	9,9	89	e.i.	e.i.	e.i.	e.i.
Kiina ^b	HP-PACl, 100 mg/L	5*	76	e.i.	e.i.	30	5
Japani ^c	PACl, 16 mg/L	6,3	92	34	26	e.i.	e.i.

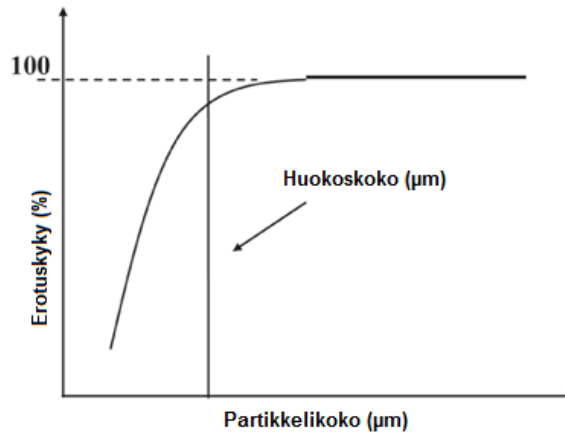
e.i.: ei ilmoitettu, PACl tarkoittaa polyammoniumkloridia, HP-liite kuvaa uutta PACl:n syntetisointimenetelmää * tarkoittaa fosfaattipitoisuutta ja sen vähenemää, a (Nedjah et al. 2015), b (Wang et al. 2009), c (Kim & Chung 2014) kokeet tehty laboratoriomittakaavassa

3.3 Mikrosiivilä esiselkeytyksessä

Mikrosiivilöinti on jäteveden esikäsittelymenetelmä, jolla poistetaan jätevedestä kiintoainetta ja orgaanista ainesta sekä ravinteita (Paulsrud et al. 2014). Sen poistotehoa ja muodostuneen lietteen ominaisuuksia voidaan verrata laskeutetun lietteen ominaisuuksiin.

3.3.1 Mikrosiivilöinnin periaate

Mikrosiivilöinnissä käsiteltävä jätevesi johdetaan rumpuun (Väänänen et al. 2016) tai vedenottokammioon, josta se suodattuu viiran läpi (Franchi & Santoro 2015). Mikrosiivilöinti perustuu partikkelien fysikaaliseen pidättymiseen viiran pinnalle. Viirroissa on tietyn kokoisia huokosia ja ensisijaisesti partikkelit, jotka ovat suurempia kuin huokokset, pidättyvät viiran pinnalle (Kuva 3). (Ljunggren 2006; Rusten et al. 2017) Kiintoainepartikkelit voivat myös adsorboitua viiran huokosiin ja tukkia viiran (Ravazzini et al. 2005). Mikrosiivilöiden huokoskoko vaihtelee 10 ja 1000 μm välillä (Väänänen 2017).

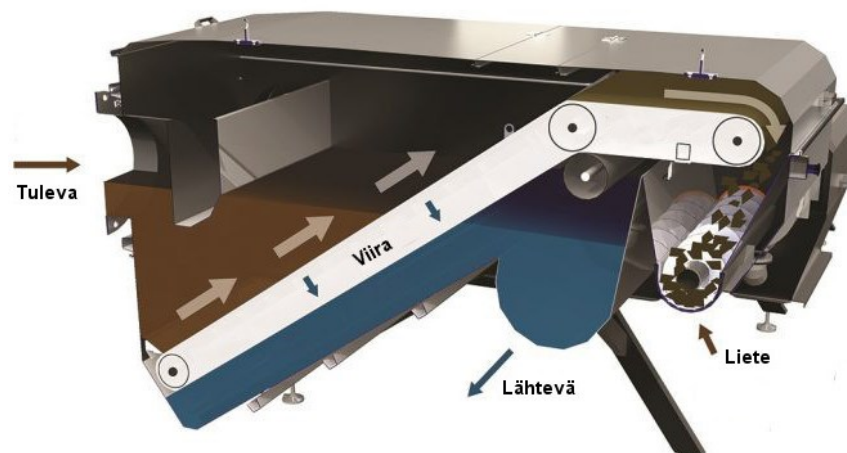


Kuva 3. Viiran erotuskyky on esitetty partikkelikoon funktiona. Erotuskyky kasvaa, kun partikkelien koko on suurempi kuin viiran huokoskoko. Huokoskokoja pienempiäkin partikkeleita pidättyy viiralle, mutta ei yhtä tehokkaasti kuin suurempia partikkeleita. Perustuu lähteeseen (Ljunggren 2006)

Mikrosiivilöissä käytetyt viiramateriaalit ovat yleensä kudottua polyesteriä tai ruostumattonta terästä. (Väänänen 2017) Polyesterin edut viiramateriaalina ovat sen joustavuus ja pinnan sileys. Ruostumaton teräs on mekaanisesti stabiili ja siinä on hyvä poikittaisjäykkyys. Paremman toiminnan ja siivilöintitulosten saavuttamiseksi näitä kahta viiramateriaalia on myös alettu yhdistää. (GKD - Gebr. Kufferath AG 2015)

3.3.2 Nauhasiivilän toiminta

Erilaisia mikrosiivilöitä ovat liikkumattomat siivilät, rumpusiivilät, kiekksiivilät ja nauhasiivilät. Tässä tutkimuksessa oli käytössä nauhasiivilä, joten myös teoriaosuudessa perehdytään nauhasiivilöintiin. Myöhemmissä vaiheissa mikrosiivilästä puhuttaessa tarkoitetaan nauhasiivilää. Nauhasiivilän toimintaperiaate on esitetty Kuvassa 4.



Kuva 4. Jätevesi tulee mikrosiivilän vedenottokammioon, josta se suotautuu pyörivän viiran läpi. Lieke ja siivilöity neste menevät erillään jatkokäsittelyyn. Perustuu lähteeseen (Salsnes Filter 2013)

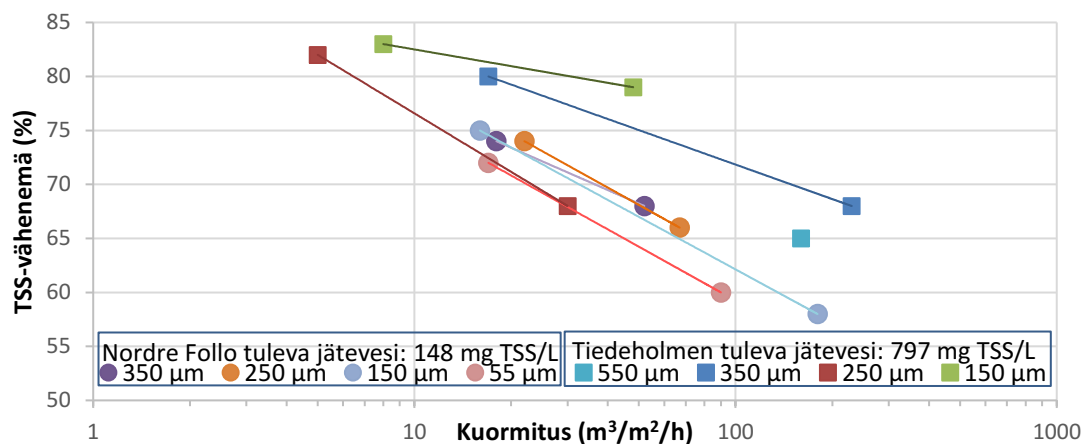
Nauhasiivilässä jätevesi tulee vedenottokammioon, jossa kiintoainne alkaa kertyä liikkuvalla viiralle (Franchi & Santoro 2015). Viiralle kertyvä kiintoainneen määrä ja kiintoainnekakun paksuus riippuvat esimerkiksi tulevan veden TSS-pitoisuudesta ja virtaamasta (Rusten et al. 2017). Vesi siivilöityy viiran läpi ja jatkaa seuraavaan käsittelyvaiheeseen. Viiralle jäänyt kiintoainne liikkuu viiran mukana ja putoaa suodatinmaton yläpäästä kouruun. Suodatinviiran pyöriessä sitä puhdistetaan paineilmalla, vedellä tai mekaanisesti. (Franchi & Santoro 2015) Nauhasiivilää voidaan operoida pitämällä viiran pyörimisnopeus vakiona, jolloin vedenpinnan korkeus muuttuu kuormituksen ja virtaaman mukaan tai pitämällä vedenpinta vakiona ja muuttamalla viiran pyörimisnopeutta. (Rusten et al. 2017)

Lietteen kiintoainepitoisuus on 2-8 %, ja se voidaan johtaa suoraan esimerkiksi anaerobiseen käsittelyyn. Lietettä voidaan myös käsitellä edelleen tiivistämällä sitä puristus- ja vedenpoistoyksikössä, jolloin saavutetaan kiintoainepitoisuus 20-30 %. (Franchi & Santoro 2015, Salsnes Filter AS 2016) Tällöin lietetilavuus pienenee, minkä on esitetty vähentävän lietteen käsittely- ja kuljetuskustannuksia (Salsnes Filter AS 2016).

3.3.3 Mikrosiivilöinti esikäsittelymenetelmänä

Viime vuosina on tutkittu mikrosiivilöiden käyttöä esikäsittelymenetelmänä perinteisen esiselkeytyksen sijaan tai sen kanssa (Paulsrud et al. 2014; Väänänen 2017; Rusten et al. 2017). Mikrosiivilöinti poistaa jätevedestä kiintoainetta, jossa on orgaanista ainetta sekä ravinteita.

Rusten & Ødegaard (2006) testasivat tulevan jäteveden virtaaman vaikutusta viiran toimintaan laboratoriomittakaavan viiratestilaitteistolla. Todellisten mikrosiivilöintiolosuhteiden simuloimiseksi, viiralle muodostettiin ensin suodatuskakku kaatamalla jätevettä viiran läpi, kunnes kakku oli muodostunut. Vasta tämän jälkeen alettiin tutkia viiran läpi menevän veden ominaisuuksia (Kuva 5).



Kuva 5. Yhdyskuntajäteveden siivilöinti 55-550 µm:n siivilöillä kahdella norjalaisella puhdistamolla. Arvot arvioita kuvasta. (Rusten & Ødegaard 2006)

Tulosten perusteella viiran huokoskoolle ei ole suurta merkitystä silloin, kun suodatuskakku on muodostunut viiran pinnalle. Nordre Follon jätevedellä noin $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ kuormituksella saavutettiin 70-75 %:n TSS-vähennys viiran koosta riippumatta. Vastaavasti myös suuremmalla TSS-kuormituksella ($50 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$) TSS-vähennys oli 65-70 % viiran koosta riippumatta. Korkean TSS-kuormituksen jätevettä käsitellessä TSS-vähennys on lähes poikkeuksetta suurempi kuin pienemmällä TSS-pitoisuudella. (Rusten & Ødegaard 2006)

Tutkimustulosten luotettavuuden lisäämiseksi mikrosiivilöintiä on tutkittu puhdistamolosuhteissa (Taulukko 6).

Taulukko 6. *Yhdyskuntajäteveden vähennätuloksia mikrosiivilällä kahdella huokoskoolle ja erilaisilla kuormituksilla. Keskihajonnat ovat suluisia. Kokeet on tehty laitosolosuhteissa täyden mittakaavan siivilöillä Australian kokeita lukuun ottamatta.*

Puhdistamo	Huokoskoko (μm)	Kuormitus ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$)	TSS tuleva (mg/L)	TSS- vähennys (%)	COD tuleva (mg/L)	COD- vähennys (%)
Tromssa, Norja ^a	350	25	331	90	e.i.	e.i.
Guldholmstrand, Norja ^a	350	116		78	e.i.	e.i.
Strømmen, Norja ^b	350	63	204	22	e.i.	19
Strømmen, Norja ^b	350	46	121	34	e.i.	24
Strømmen, Norja ^b	350	146	534	59	e.i.	39
Australia ^c	350	e.i.	345 (75)	38 (13)	810	23
Blaricum, Hollanti ^d	350	200	242	50 (33)	441	35 (25)
Oslo, Norja ^e	33	22 (2)	165 (70)	41	355 (93)	31
keskiarvo				52		29

e.i.: ei ilmoitettu, a (Rusten & Ødegaard 2006), b (Rusten et al. 2017) yksittäisiä ajoparametreja ja tuloksia, c (Franchi & Santoro 2015) laboratoriomittakaavan tutkimus viiralla, d (Ruiken et al. 2013), e (Rusten et al. 2016)

Kiintoaineen ja COD:n vähennyksessä eri puhdistamoiden ja ajojen välillä oli paljon eroja. Eroja tuloksiin aiheuttavat erilaiset ajoparametrit, kuten kuormitus, veden pinnan korkeus, viiran huokoskoko ja syötön TSS-pitoisuus. Tromssan puhdistamolla erittäin korkeaan TSS-vähennykseen (90 %) päästiin, kun kuormitus pidettiin maltillisena ($25 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$) ja viiran päälle muodostui paksu kakku. Lähes 80 %:n vähennykseen päästiin Guldholmstrandissa, missä viiran kuormitus oli yli nelinkertainen Tromssan puhdistamoon nähden. (Rusten & Ødegaard 2006) Rusten et al. (2017) havaitsivat, että pienellä

tulevan veden TSS-pitoisuudella (121 mg/L) ja pienellä viiran kuormituksella (46 m³/m²/h) suurin osa vedestä virtaa läpi viiran alaosan, missä on vain ohut suodatuskakku tai ei lainkaan kakkua, vaikka viiran yläosassa onkin paksu suodatuskakku. Sen sijaan tulevan jäteveden suuri TSS-pitoisuus (yli 200 mg/L) ja korkea viiran kuormitus (146 m³/m²/h) nostivat TSS-vähenemää. (Rusten et al. 2017) TSS-pitoisuudella 204 mg/L TSS-vähenemä oli 22 %, mikä kuvaa suodatuskakun tärkeyttä. Viiran kuormitus oli keskimääräinen (63 m³/m²/h), mutta viiran pinnalle ei muodostunut suodatuskakkua, jolloin viiran TSS-vähenemä oli vain 22 %. (Rusten et al. 2017) Rusten & Ødegaard (2006) tutkimuksen perusteella pienellä kuormituksella voidaan päästä suurimpiin TSS-vähennyksiin, mutta Rusten et al (2017) tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tämä edellyttää suodatuskakun muodostumista. Toisaalta pienellä viiran huokoskoolla (33 µm) ja pienellä viiran kuormituksella on päästy kohtalaisiin (41 %) TSS-vähennyksiin, vaikka suodatuskakkua ei olekaan muodostettu viiralle (Rusten et al. 2016). Myös viiran nopeus ja nestepinnan korkeus vaikuttavat kiintoaineen vähenemään (Taulukko 7).

Taulukko 7. *Yhdyskuntajäteveden laskennalliset kiintoainevähennykset mikrosiivilöinnissä siivilän kolmella eri vedenpinnan korkeudella ja neljällä eri viiran nopeudella. (Rusten et al. 2017)*

Viiran nopeus (m/min)	Kiintoaineen vähenemä (g TSS/m ²)		
	250 mm	150 mm	50 mm
1	64	52	35
4	47	31	21
8	40	24	10
12	36	21	8

Rusten et al. (2017) tutkimusten mukaan pitämällä nestepintaa viiralla mahdollisimman korkealla, kiintoaineen poisto on tehokkainta. Viiran nopeutta hidastamalla kiintoaineen poistotulokset kasvavat (Taulukko 7). Hyvin matalalla nestepinnalla (50 mm) ja hitaalla viiran nopeudella (1 m/min) TSS-vähenemä oli 35 g/m², kun 250 mm nestepinnalla ja korkealla viiran nopeudella (12 m/min) vähenemä oli 36 g/m².

Jäteveden esikäsitteilyä voidaan tehostaa kemikaaleilla (CEPT). Myös nauhasiivilöiden puhdistustehon parantamista on testattu erilaisilla polymeereillä (Taulukko 8). (Rusten & Ødegaard 2006; Franchi & Santoro 2015; Väänänen et al. 2016)

Taulukko 8. *Polymeerin lisäyksen jälkeiset yhdyskuntajäteveden puhdistustehokkuudet nauhasiivilällä. Keskiarvojen keskihajonnat ovat suluisissa.*

Puhdistamo	Polymeeri ja annostus (mg/L)	Huokoskoko (µm)	Kuormitus (m ³ /m ² /h)	TSS tuleva (mg/L)	TSS-vähennemä
Bangsund, Norja^a	Pemcat 163 -polymeeri, 1	850, 250	25	e.i.	66
Ås, Norja^b	Polyakryyliamidi, 0,98	250	41	e.i.	59
Ås, Norja^b	Polyakryyliamidi, 1,77	350	43	e.i.	70
Australia^c	kationinen polymeeri, 2	350	e.i.	345 (75)	72 (5)
Australia^c	kationinen polymeeri, 2	250	e.i.	345 (75)	74 (4)
keskiarvo					68

e.i.: ei ilmoitettu, a (Rusten & Ødegaard 2006), b (Rusten et al. 2017), c (Franchi & Santoro 2015), laboratoriomittakaavan tutkimus viiralla

Rusten & Ødegaard (2006) saavuttivat 66 %:n TSS-vähennemän mikrosiiviläkokeissa, joissa tuleva vesi siivilöitiin ensin 850 µm:n siivilän läpi, minkä jälkeen lisättiin polymeeri ja siivilöitiin vielä 250 µm:n siivilän läpi. Polymeerilisäyksellä kaikissa koeajokoh-teissa saavutettiin yli 59 %:n TSS-vähennemä, mikä ylittää Euroopan unionin primääripuhdistukselle asettaman 50 %:n kiintoainevähennemän vaatimuksen. Polymeerilisäyksen ansiosta TSS-vähennemät mikrosiivilällä olivat keskimäärin 68 %, mikä on 31 % enemmän kuin TSS-vähennemät ilman polymeerilisäystä. Polymeerilisäys lisää kiintoaineen vähennemää ilman polymeerilisäystä tehtyyn ajoon verrattuna.

Primäärisen käsittelyn jälkeen jätevesi käsitellään aerobisesti (Kuva 1) typen poistamiseksi. Biologinen prosessi tarvitsee orgaanista ainesta toimiakseen, minkä vuoksi kiintoainetta ei tule poistaa liikaa. (Paulsrud et al. 2014; Rusten et al. 2016) Liikkuvan kantoaineen reaktorien (MBBR) nitrifikaatio parani 10-15 %:lla, kun esikäsittelynä käytettiin 33 µm:n mikrosiivilää pelkän välppäyksen sijaan. Tämä johtui siitä, että kiintoainekuormitus MBBR-prosessille oli pienempi, kun esikäsittelynä käytettiin mikrosiivilää pelkän välppäyksen sijaan. Lisäksi hapenkulutus biologisessa vaiheessa oli 36 % pienempi kuin ilman siivilää. (Rusten et al. 2016) Riittävä kiintoaineen poisto on kannattavaa myös siksi, että silloin saadaan mahdollisimman paljon jäteveden energiasisällöstä talteen lietteen anaerobisessa jatkokäsittelyssä (Rusten et al. 2017).

Ravinteiden poistamiseen mikrosiivilällä on kiinnitetty vähän huomiota pääpainon ollessa kiintoaineen ja orgaanisen aineen poistossa. Mikrosiivilällä pystytään poistamaan noin 20 % kokonaisfosforista. Kokonaisfosforin poiston tehostamiseksi jäteveteen voidaan lisätä kationista polymeeriä ennen mikrosiivilöintiä, millä voidaan päästä 50-90 %:n vähennemään. Erillisellä koagulantilla ja polymeerillä voidaan saavuttaa yli 95 %:n fosforivähennemä (Väänänen et al. 2016). Mikrosiivilällä saavutetut fosforivähennemät ovat suu-

ria verrattuna laskeutuksen noin 10 %:n fosforivähennykseen. Toisaalta kemiallisella laskeutuksen tehostuksella fosforivähennys oli keskimäärin 86 %, mikä vastaa tehostetulla mikrosiivilöinnillä saavutettuja fosforivähennyksiä.

3.3.4 Mikrosiivilöinnin edut laskeutukseen verrattuna

Mikrosiivilöiden etuna laskeutukseen verrattuna pidetään pienempää tilantarvetta, rakenteiden tarvetta (laskeutuslaitteiden perustuksiin verrattuna), käyttökustannuksia ja ylläpitoa. Kerättyä lietettä ei myöskään tarvitse jatkotiivistää, kun liete kuivataan puristusyksikössä siivilöinnin jälkeen. (Franchi & Santoro 2015, Salsnes Filter AS 2016)

Rusten et. al (2017) tutkivat laskeutuksen korvaamista Norjalaisella Nedre Romeriken jätevedenpuhdistamolla ja totesivat nauhasiivilän vievän vain 16 % laskeutuslaitteiden vaatimasta tilasta. Yhdyskuntajäteveden mikrosiivilöinnillä on saavutettu energiansäästöä verrattuna perinteiseen laskeutukseen ja jäteveden puhdistukseen ilman esikäsittelyä (Taulukko 9).

Taulukko 9. Yhdyskuntajätevedenkäsittelyn energiansäästö (%), kun mikrosiivilöintiä verrataan ilman esikäsittelyä tai laskeutuksella tehtyyn jätevedenkäsittelyyn.

Esikäsittelymenetelmä	Mikrosiivilöinnin säästö verrattuna ei esikäsittelyä	Mikrosiivilöinnin säästö verrattuna laskeutus
Esikäsittely	e.i.	50 ^c
Aktiivilieteprosessi	30 ^a	33 ^c
Lietteen käsittely	5 ^a	e.i.
Kokonaissäästö	28 ^a -40 ^b	50 ^d

e.i.: ei ilmoitettu, a (Franchi & Santoro 2015), b (Ruiken et al. 2013), c (Razafimanantsoa et al. 2014), d (Rusten & Ødegaard 2006)

Franchi & Santoro (2015) vertasivat jäteveden puhdistusta ilman primäärikäsittelyä ja mikrosiivilöinnin kanssa. Kun saatu liete käsiteltiin anaerobisesti, oli energiansäästö 28 % ilman primäärikäsittelyä tehtyyn jätevedenkäsittelyyn verrattuna. Energiankulutus laski erityisesti biologisessa ja lietteiden käsittelyssä. Hollantilaisella Blaricumin jätevedenpuhdistamolla (virtaama 38 400 m³/d) tehtiin laskelmia mikrosiivilöinnin lisäämisestä esikäsittelyprosessiksi. Tällä hetkellä laitoksella ei ole käytössä esikäsittelyprosessia. Mikrosiivilöinnin lisääminen vähentäisi aerobisen prosessin ilmastustarvetta ja lietteenkäsittelykustannuksia, minkä ansiosta siivilän takaisinmaksuaika on 7 vuotta, minkä jälkeen säästettäisiin arviolta 125 000 euroa vuodessa. (Ruiken et al. 2013) On arvioitu, että jätevedenkäsittelyn kustannussäästö (investointi- ja ylläpitokustannukset) olisi jopa 50 %, kun käytetään mikrosiivilää laskeutuksen sijaan. (Rusten & Ødegaard 2006).

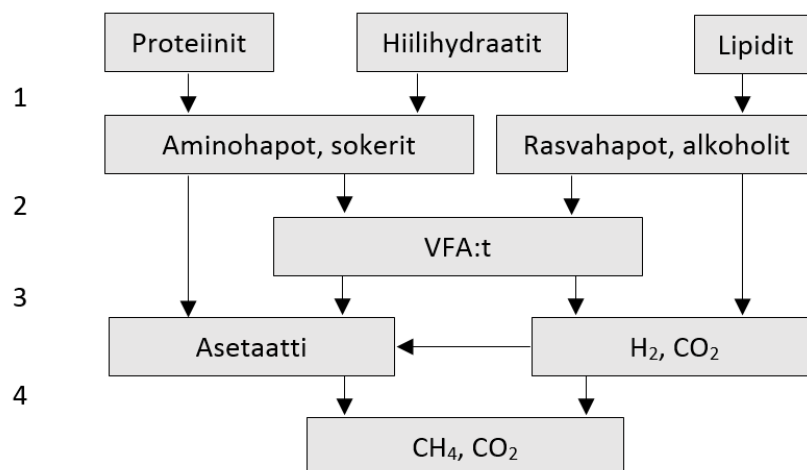
Mikrosiivilä voidaan myös lisätä laitoksille, joissa jäteveden käsittelykapasiteetti ei enää riitä esimerkiksi liittyjämäärän seurauksena. Jos alueelle ei ole mahdollista, esimerkiksi tilanpuutteen takia, rakentaa lisää laskeutusaltaita, voidaan mikrosiivilöitä käyttää esikäsittelymenetelmänä ja lisätä biologisen käsittelyn kapasiteettia muuttamalla laskeutusaltat aktiivilietealtaiksi. (Paulsrud et al. 2014)

4. LIETTEIDEN KÄSITTELY BIOKAASUPROSESSISSA

Puhdistamoliete sisältää orgaanista ainetta, ravinteita ja patogeenejä, minkä takia sen käsittely on tärkeää. Lietteen anaerobisella käsittelyllä lietteen energiasisältö voidaan muuttaa biokaasuksi ja liete voidaan stabiloida, mikä vähentää hajua ja patogeeneja. Riippuen mädätteen ravinnesisällöstä ja muista ominaisuuksista (haitta-aineista), se voidaan hyödyntää myös maatalouden lannoitteena tai maanparannusaineena. Siksi puhdistamolietteen anaerobinen käsittely on yleistä ympäri maailmaa. (Wellinger et al. 2013)

4.1 Orgaanisen aineen anaerobinen hajoaminen

Biokaasuprosessissa anaerobiset mikro-organismit hajottavat orgaanista ainetta anaerobisissa olosuhteissa. Anaerobisessa hajoamisessa on neljä päävaihetta (Kuva 6), joista ensimmäisessä hydrolyyttiset bakteerit hajottavat monimutkaisia polymeereja entsyymien avulla monomeereiksi. Toisessa vaiheessa asidogeeniset fermentatiiviset bakteerit hajottavat monomeereja haihtuviksi rasvahapoiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi. Kolmannessa vaiheessa, asetogeneesissä, rasvahappoja (VFA:ta) ja alkoholeja hapettuu asetaattiksi, vedyksi ja hiilidioksidiksi. Metanogeeniset mikrobit muodostavat metaania asetaatin hajoamistuotteena ja vedyn ja hiilidioksidin välisessä reaktiossa. (Wellinger et al. 2013)



Kuva 6. Anaerobisen hajoamisen vaiheet ovat 1. hydrolyysi, 2. asidogeneesi 3. asetogeneesi ja 4. metanogeneesi.

Biokaasusta 50-70 % on metaania ja 30-50 % hiilidioksidia. Biokaasun lämpöarvo on 19-26 MJ/m³. (Wellinger et al. 2013)

Biokaasun tuotanto ja orgaanisen aineen hajoaminen riippuvat prosessiparametreista. Hydraulisen viipymän (HRT) on oltava tarpeeksi pitkä, jotta metanogeenit eivät huuhdoutu ulos reaktorista. Orgaaninen kuormitus (OLR) kuvataan yleensä VS-kuormituksen (kg VS/m³/d). Prosessi tarvitsee myös makroravinteita (tyyppiä ja fosforia) sekä mikroravinteita (kuten rauta, nikkeli ja koboltti) toimiakseen. Reaktorin pH kertoo prosessin tasapainosta. pH:n laskiessa alle 6:teen, haihtuvat rasvahapot inhiboivat metanogeenia. Korkeissa pH:issa (yli 8) ammoniakki aiheuttaa inhibitiota. (Wellinger et al. 2013)

4.2 Lietteiden biokaasuntuottopotentiaali

Jätevedenkäsittelyn esikäsittelyn lietteellä on eroa metaanintuottopotentiaaleissa, riippuen onko liete laskeutettua vai mikrosiivilöityä (Taulukko 10).

Taulukko 10. *Metaanintuottokokeiden metaanintuotot laskeutuksella ja mikrosiivilöinnillä tuotetulle yhdyskuntajätevedenpuhdistamon primääri- ja sekalietteelle.*

Liete	TS (%)	VS (%)	Metaanintuotto (L CH ₄ /kg VS)	Polymeeri
Laskeutettu primääriliete, Norja ^a	2,7	2,2	259-325	ei
Laskeutettu primääriliete, Australia ^b	3,7	3,0	331	ei
Mikrosiivilöity primääriliete, Norja ^a	27,3	25	323-366	ei
Mikrosiivilöity primääriliete, Norja ^c	e.i.	e.i.	317	ei
Mikrosiivilöity primääriliete, Norja ^c	6	5,2	483	Polyakryyliamidi, 0,9-1,8 mg/L
Sekaliete, Suomi ^d	2,4	1,3	278-320	ei

e.i.: ei ilmoitettu, a (Paulsrud et al. 2014), mikrosiivilöity liete puristettu heti siivilöinnin jälkeen korkeamman kiintoainepitoisuuden saavuttamiseksi. b (Wei et al. 2017), c (Rusten et al. 2017), d (Luostarinen et al. 2009), reaktorikoe

Mikrosiivilöidyn lietteen metaanintuotto vaihtelee 317-366 L CH₄/kg VS ja laskeutetun primäärilietteen 259-331 L CH₄/kg VS. Mikrosiivilöidyn lietteen keskimääräinen metaanintuotto (342 CH₄/kg VS) on 16 % suurempi kuin laskeutetun primäärilietteen (295 CH₄/kg VS). Kun mikrosiivilöintiä tehostetaan polymeeriä käyttämällä, voidaan saavuttaa 32-52 % suurempi metaanintuotto kuin ilman polymeeriä ja 46-86 % suurempi metaanintuotto kuin perinteisellä esiselkeytyksellä (Taulukko 10). Lietteiden biohajoaminen on hidasta, sillä suurin osa lietteen orgaanisesta aineesta on soluja, joilla on puolijäykkä rakenne, joka suojaa solua hajoamiselta. Hydrolyysi on anaerobisen hajoamisen hitain

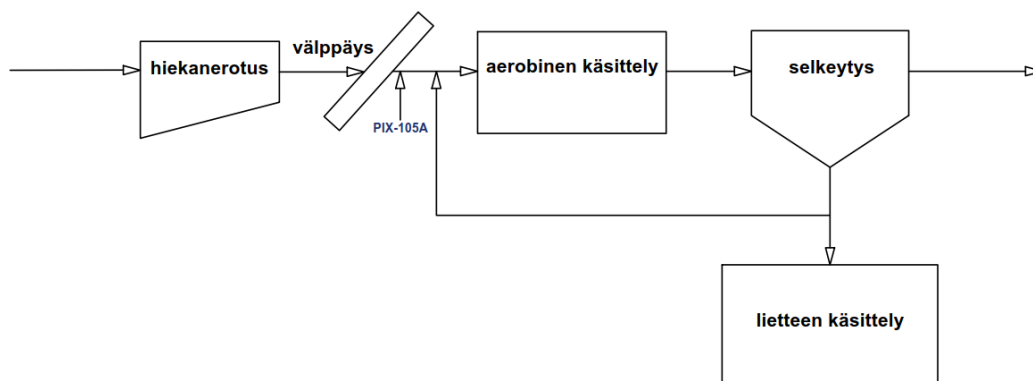
vaihe, sillä sen aikana solujen seinät ja solujen ulkopuoliset polymeeriset aineet hajotetaan helposti biohajoavaksi orgaaniseksi aineeksi. (Appels et al. 2008) Polymeerilisäyksellä saavutettu suurempi metaanintuotto johtuu mahdollisesti polymeerin kyvystä sitoa pienempiä partikkeleita, jotka ovat isoja helpommin biohajoavia (Rusten et al. 2017). Aiemmissa tutkimuksissa on saavutettu suurempi metaanintuotto, kun yhdyskuntalietteen on lisätty polymeeriä ennen anaerobista käsittelyä (Chu et al. 2003; Marañón et al. 2013). Polymeerien ansiosta ravinteiden kulkeutuminen bakteereille on voinut tehostua, jolloin metaanintuottokin on tehostunut (Marañón et al. 2013).

5. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Diplomityössä testattiin mikrosiivilää, joka on vaihtoehtoinen menetelmä perinteiselle jäteveden primäärikäsittelylle, esiselkeytykselle. Mikrosiivilää operoitiin eri polymeereillä ja polymeeriannostuksilla 1-2 g/m³ sekä saostuskemikaalilisäyksellä ja ilman lisäystä. Metaanintuottopotentiaalien ja ravinnepitoisuuksien perusteella valittiin lietteet reaktori-kokeisiin, joissa tutkittiin mikrosiivilällä erotetun ja laskeutetun lietteen metaanintuottoa.

5.1 Kohdepuhdistamo

Kullaanvuoren jätevedenpuhdistamo sijaitsee Nokialla ja sen viemäriverkostoon kuuluu noin 28 100 asukasta. Puhdistamolle tulee myös teollisuusjätevesiä ja hulevesiä. Puhdistamo on valmistunut joulukuussa 1974. Aluksi puhdistamo toimi kemiallisena puhdistamona, mutta vuonna 1988 se muutettiin kaksilinjaiseksi biologiseksi rinnakkaissaostuslaitokseksi. Vuonna 2015 päivittäinen käsitelty jäteveden määrä oli keskimäärin 10 000 m³. Puhdistamon yksikköprosessit ovat tulopumppaus, hiekanerotus, porrasvälppäys, ferri-sulfaatin (PIX-105A) syöttö, ilmastus ja selkeytys (Kuva 7). Selkeytyksestä poistettu liete tiivistetään ja lingotaan ennen jatkokäsittelyä. (Nokian vesi 2017)



Kuva 7. Kullaanvuoren jätevedenpuhdistamon yksikköprosessit.

5.2 Polymeerikokeet

Koeajoihin vaihtoehtona oli yksi nonioninen, 8 kationisista ja 3 anionista polymeeriä (Kemira) sekä Flopam-polymeeri (SNF Group). Polymeereille tehtiin saostuskoe laboratoriossa, missä testattiin Kullaanvuoren tulevan jäteveden (PIX lisäyksellä ja ilman) saostumista eri polymeereillä ja annostuksilla (0,5, 2 ja 4 mg/L). Saostuskokeissa polymeeri lisättiin 600 mL:aan tutkittavaa jätevettä, minkä jälkeen näytettä sekoitettiin ensin pika-sekoituksella 10 s (400 rpm), sitten hämmennyksellä 20 min (40 rpm), minkä jälkeen sakan annettiin laskeutua 30 min.

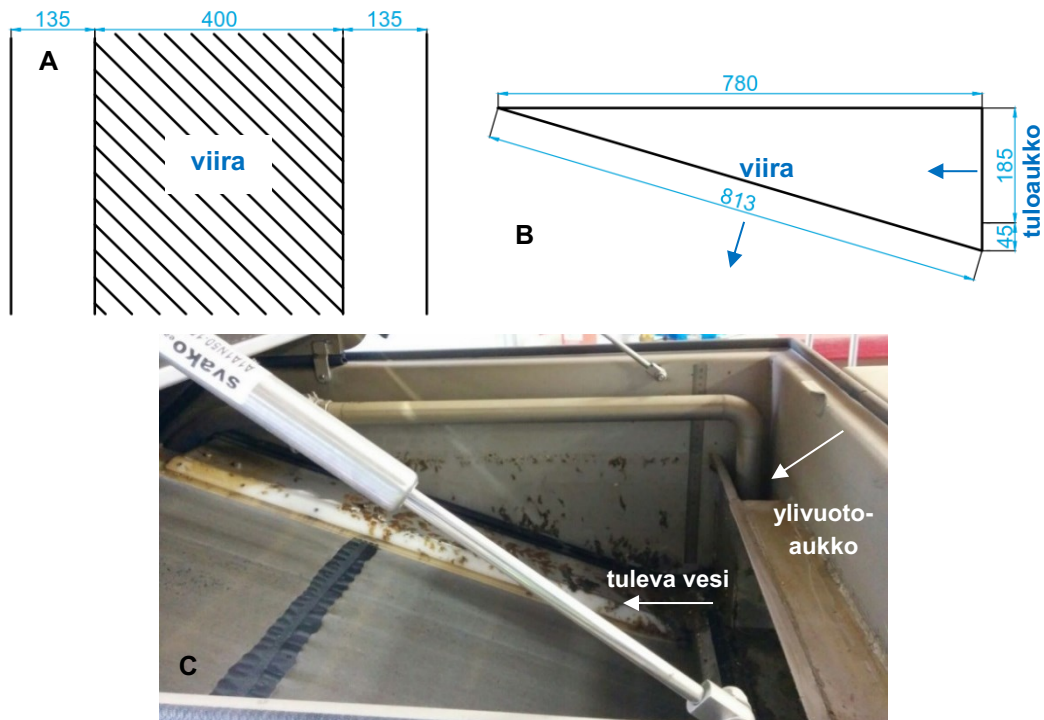
Alkuperäisestä jätevedestä ja saostuksen jälkeen erottuneesta vedestä analysoitiin TSS ja VSS. Saostuskokeissa muodostuneen sakan määrä arvioitiin, minkä jälkeen näyte kaadettiin 210 μm :n viiran läpi, minkä jälkeen arvioitiin silmämääräisesti viiralle jääneen sakan määrä ja läpi menneen nesteen tummuus. Kokeella pystyttiin arvioimaan, kuinka suuri osa polymeerin saostamasta kiintoaineesta pidättyi viiralle.

5.3 Koeajot mikrosiivilällä

Nokian jätevedenpuhdistamolla tehtiin koeajoja mikrosiivilällä. Koeajoissa käytettiin erilaisia polymeerejä ja polymeeriannostuksia.

5.3.1 Koelaitteisto

Koeajoissa käytettiin Salsnes filter 1000 mikrosiivilää, jonka mitat olivat 1,4 x 1,3 x 1,4 m, tuloputken halkaisija on 100 mm ja poistoputken 150 mm. Viiran ja veden tuloaukon leveys oli 400 mm. Vedenottokammion kokonaisleveys oli 670 mm ja kokonaiskorkeus 230 mm, josta veden tuloaukon korkeus oli 185 mm (Kuva 8). Veden korkeuden ylittäessä vedenottokammion korkeuden, aiheutui ylivuoto. Mikrosiivilän energiankulutus on 3,1 kW ja maksimi painehäviö 440 mm. (Salsnes Filter AS 2016) Viiran huokoskoko oli 210 μm ja aukon osuus viiran koko pinta-alasta oli 35 %:a. Viiran pituus oli 813 mm ja leveys 400 mm, jolloin suotopinta-ala maksimivirtaamalla on 0,325 m².



Kuva 8. Viira suoraan ylhäältä (A) ja sivusta (B) sekä sivulta otettu valokuva (C) (Nissinen 2017)

5.3.2 Koeajot

Koeajot tehtiin 16.3.-11.4.2017. Koeajoissa vaihdeltiin seuraavia parametreja; ajot PIX-lisäyksellä ja ilman lisäystä, polymeeri ja polymeeriannostus (0, 1 tai 2 g/m³) (Taulukko 11). Virtaama, suotopinta-ala ja kuormitus pyrittiin pitämään vakiona koeajojen aikana.

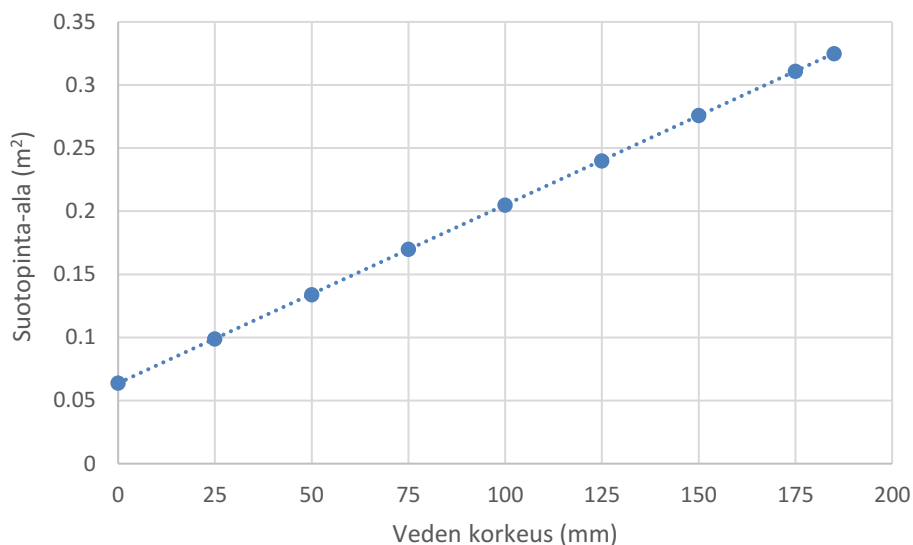
Taulukko 11. Koeajojen olosuhteet.

Polymeeri	Virtaama (m ³ /h)	Suotopinta- ala (m ²)	Kuormitus (m ³ /m ² /h)	Polymeeri-annostus (g/m ³)	PIX
ei polymeeriä	7,80	0,290	26,9	0,00	PIX
ei polymeeriä	7,24	0,291	24,9	0,00	-
Flopam	7,18	0,292	24,6	1,07	PIX
Flopam	7,65	0,293	26,1	0,97	PIX
Flopam	8,17	0,295	27,7	0,91	-
Flopam	7,57	0,285	26,6	1,98	-
Flopam	8,08	0,289	28,0	1,86	-
C-492HMW	7,67	0,280	27,4	1,07	-
C-492HMW	7,98	0,285	28,0	1,89	-
C-492HMW	7,94	0,292	27,2	1,88	-
C-492HMW	7,42	0,283	26,3	1,95	-
C-493VP	7,38	0,286	25,8	1,43	-
C-493VP	7,81	0,283	27,6	2,13	-

- : PIX:iä ei lisätty ajoon

Ajot aloitettiin tarvittaessa pysäyttämällä PIX:n syöttö laitokselle tulevaan jäteveeten. Tämän jälkeen aloitettiin jäteveden pumppaus mikrosiiville. Pumpun taajuutta säädettiin halutun jäteveden virtaamaan saavuttamiseksi. Tämän jälkeen aloitettiin mahdollisen polymeerin syöttö jäteveden tulosäiliöön. Polymeerin syötön aloituksen jälkeen odotettiin noin 30 minuuttia, jotta polymeeripitoisuus syöttösäiliössä vakiintui, minkä jälkeen aloitettiin tulevan ja lähtevän veden näytteenotto sekä lietteen keräys. Koeajon kesto oli 1-3 tuntia.

Kaikki liete kerättiin aluksi saaveihin, jotta saatiin mitattua lietteen kokonaismäärä ja otettua edustava kokoomanäyte. Tulevasta ja lähtevästä vedestä otettiin ajon ajalta kokoomanäytteet (300 ml näytettä joka 3-5 minuutti, riippuen ajoajasta). Ajon aikana viiran toimintaa säädettiin muuttamalla minimivedenpintaa viiralla. Vedenpinnan minimiä nostamalla viira pyöri hitaammin ja laskemalla pyöriminen oli nopeampaa. Vedenpinta pyrittiin pitämään mahdollisimman korkealla suuren suotopinta-alan saavuttamiseksi, kuitenkin niin, ettei ylivuotoa tapahtunut (Kuva 9). Suotopinta-ala oli kaikissa koeajoissa 0,280-0,295 m².



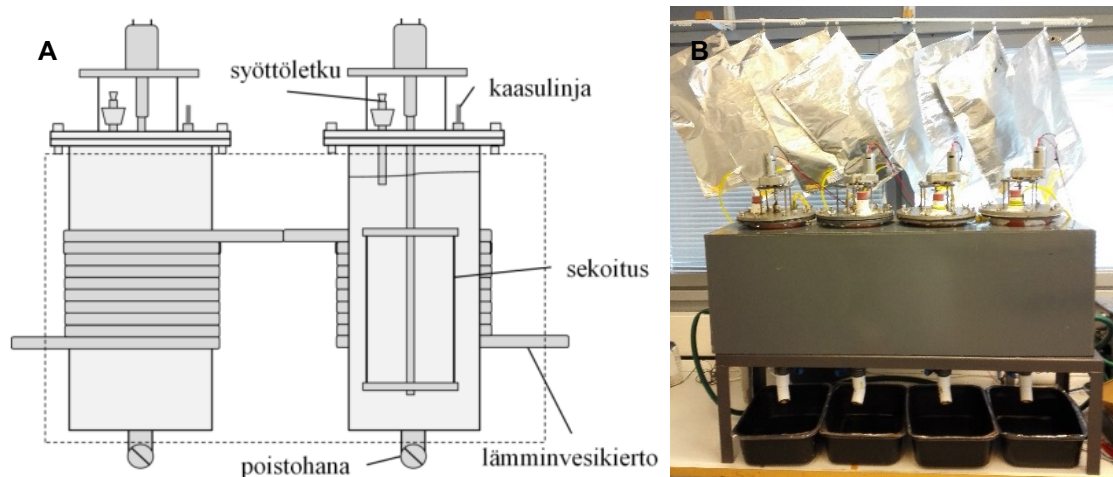
Kuva 9. Suotopinta-ala viiralla veden pinnankorkeuden funktiona.

Kullaanvuoren jätevedenpuhdistamolla ei ole esiselkeytystä, joten reaktorikokeissa käytetty vertailuliete valmistettiin erikseen. Kemikaloimatonta, välpätyä jätevettä laskeutettiin laskeutusastiassa 1,5-17 tuntia, minkä jälkeen selkeytynyt vesi poistettiin astian pinnalta varovasti kaatamalla. Lietettä laskeutettiin vielä toisessa astiassa tunnin ajan, minkä jälkeen poistettiin jälleen selkeytynyt nestefaasi kaatamalla.

5.4 Reaktorikokeet

Biokaasureaktorien kuormitus oli tarkoitus saada lähelle $2 \text{ kg VS/m}^3\text{d}$, minkä takia osaa kokeisiin valituista lietteistä tiivistettiin. Laskeutettu liete sekoitettiin ja jätettiin laskeutumaan 4 vuorokaudeksi, jonka jälkeen nestefaasista pumpattiin vettä pois noin 200 mL minuutissa. Pumpattu nestemäärä oli 5,1 L. Muita syötteitä laskeutettiin 10 vuorokautta, jonka jälkeen nestefaasia imettiin pois varovasti ruiskua ja letkua käyttäen. Yhden näytteen kohdalla tämä toistettiin vielä kahtena peräkkäisenä päivänä. Nestefaasien poisto ja lietteiden säilytys tehtiin $4 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa. Reaktorien 2 ja 3 lietteitä laskeutettiin lisää vielä reaktorikokeiden aloittamisen jälkeen, jotta saatiin OLR lähemmäs $2 \text{ g VS/m}^3\text{d}$.

Reaktorikokeet tehtiin neljässä puolijatkuvatoimisessa täyssekoitteisessa tankkireaktorissa (CSTR) (Kuva 10). Reaktorien tilavuus oli 5,5 litraa ja nestetilavuus alussa 5 litraa. Nestetilavuus muutettiin 4 litraan kuudentena ajopäivänä. Reaktoreiden lämpötila pidettiin lämminvesikierrolla $35 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa ja sekoitus (28 rpm) oli päällä kerran tunnissa puoli tuntia kerrallaan. Reaktoreita syötettiin niiden yläosassa olevan 20 mm halkaisijaltaan olevan syöttöputken kautta. Syöttöputken pää oli nestepinnan alapuolella. Reaktoreissa muodostunut kaasu kerättiin reaktorien yläpuolella oleviin kaasupusseihin.



Kuva 10. A: CSTR reaktorien rakenne ja poikkileikkauskuva (Ylä-Outinen 2014)
B: Valokuva reaktoreista toiminnassa.

Reaktorien ympäristä käytettiin Tampereen Viinikan jätevedenpuhdistamon biokaasulaitoksesta saatua mädätettä, jonka VS oli 1,8 % ja TS 3,3 %. Alussa reaktorit (5 l) täytettiin pelkällä ympillä. Reaktoreiden hydraulinen viipymä oli 20 päivää ja niitä syötettiin viitenä päivänä viikossa 280 ml kerrallaan. Reaktorien nestetilavuus pidettiin 4:ssä litrassa. Reaktorien syötteet ja niiden kuormitukset on koottu Taulukkoon 12.

Taulukko 12. Reaktoreihin syötetyt lietteet ja reaktorien kuormitus seitsemää arkipäivää kohti. Keskihajonta on suluisa.

Reaktori	Syöte	OLR (g VS/ m ³ d)
R1	Laskeutettu liete	1,26 (0,03)
R2	Viira ilman polymeeriä	1,36 (0,05)
R3	Viira + Flopam	1,23 (0,05)
R4	Viira + C-492HMW	1,37 (0,08)

Reaktorien 1 ja 4 lietteiden VS-pitoisuudet muuttuivat jonkin verran ajojen aikana, minkä takia myös kuormituksessa oli pientä vaihtelua.

5.5 Näytteenotto reaktoreista ja analyysimenetelmät

Mikrosiivilälle tulevasta ja lähtevästä jätevedestä analysoitiin TSS, VSS ja sCOD. Ennen lietteiden valintaa reaktorikokeisiin, niistä analysoitiin kiintoaine (TS), hehkutushäviö (VS) sekä metaanintuottopotentialiaali panoskokeissa. Lietteistä analysoitiin lisäksi ammoniumtyppi (NH₄⁺), Kjeldahlin typpi (TKN), kokonaisfosfori (TP) ja liukoinen fosfaatti (PO₄). Reaktoreista poistetuista mädätteistä analysoitiin päivittäin pH, kaksi kertaa viikossa sCOD ja VFA:t ja kerran viikossa VS ja TS. Lisäksi reaktorien kaasuntuotto ja -pitoisuus mitattiin kolmesti viikossa ja tulokset laskettiin viikkokeskiarvoina.

Suspendoitunut kiintoaine (TSS) ja suspendoitunut orgaaninen kiintoaine (VSS) analysoitiin SFS standardin mukaan (SFS-EN 872). Kiintoaine (TS) ja hehkutusjäännös (VS) määritettiin SFS-standardin perusteella (SFS 3008 1990). Kokonais- ja ammoniumtyppi määritettiin Kjeldahl-menetelmällä. Kokonaisfosforin määrittämiseksi näyte märkäpollettiin ja tehtiin ICP-OES-mittaus. Liukoisen fosforin määrittämiseksi tehtiin 1/5-vesiuutto ja mittaus Skalar-autoanalysaattorilla laitevalmistajan ohjeen mukaan. Panoskokeet tehtiin 0,5 L:n pulloissa automatisoidulla laitteistolla (Bioprocess Control Ltd, Ruotsi) 35 ± 1 °C:ssa. Ympäristönä kokeissa käytettiin Viinikanlahden jätevedenpuhdistamon mädänettä (185 g/pullo) ja lietteen ja ympin VS/VS-suhde oli 1. Nestetilavuus pulloissa säädettiin 0,3 L:aan tislattulla vedellä ja pH säädettiin tarvittaessa (pH:n ollessa alle 7,5) 3 M NaOH:lla noin 8:aan. Luonnonvarakeskus teki ravinneanalyysit sekä metaanintuottopotentialikokeet.

Liukoisen COD:n ja VFA:n määrittämisessä näytteet sentrifugoitiin (4000 rpm, 15 min) ja suodatettiin 0,45 µm -suodattimilla (Macherey-Nagel Chromafil Xtra PET). Liukoisen kemiallisen hapenkulutuksen (sCOD) määrittäminen tehtiin SFS:n standardin mukaisesti (SFS 5504 1988). pH mitattiin WTW:n mittarilla 3210 ja SenTix 41 -elektrodilla.

Haihtuvien rasvahappojen pitoisuudet määritettiin kaasukromatografilla (Shimadzu GC-2010 Plus, FID, ZB-wax plus -kolonni 27,6 m x 0,25 mm x 0,25 µm). Heliumia käytettiin kantajakaasuna (81,6 ml/min) ja määrittäykset tehtiin asetusparametreilla: detektori 250 °C, injektor 250 °C, kolonni 40 °C, injektio-tilavuus 1 µl. Lämpötilaa nostettiin seuraavasti: 2 min 40 °C, 20 °C/min 160 °C:seen, 40 °C/min 220 °C:seen, jossa lämpötilaa pidettiin 2 min.

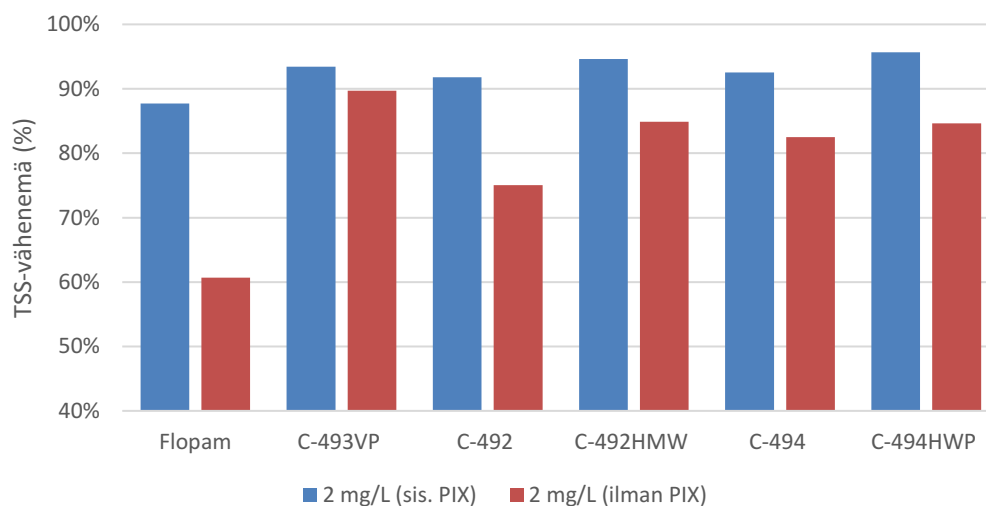
Biokaasun metaani- ja hiilidioksidipitoisuus analysoitiin kaasukromatografilla (Shimadzu GC-2014, TCD, Porapak N 80–100 MESH -kolonni 2 m x 2,0 mm). Typeä käytettiin kantajakaasuna (20 ml/min) ja määrittäykset tehtiin asetusparametreilla: detektori 110 °C, injektor 110 °C ja kolonni 80 °C. Biokaasun tilavuus reaktorikokeissa mitattiin vedensyrjäytysmenetelmällä. Mitatut tilavuudet muutettiin standardipaineeseen ja -lämpötilaan ($T = 296$ K, $p = 1.013$ bar).

6. TULOKSET

Kokeellisen osuuden alussa maaliskuussa tehtiin koeajot Nokian Kullaanvuoren jätevedenpuhdistamolla. Koeajoissa testattiin mikrosiivilän kiintoaineen ja ravinteiden poistotehoa vaihtelemalla olosuhteita, kuten polymeerejä ja polymeeriannostusta sekä PIX-lisäystä ennen ajoa tai PIX-lisäyksen pois jättämistä. Koeajojen jälkeen tehtiin mikrosiivilälietteillä 62-90 päivän reaktorikokeet CSTR-reaktoreissa, joissa tutkittiin lietteiden biokaasuntuottoa, orgaanisen aineen anaerobista hajoamista ja kuormitusta sekä prosessin stabiiliutta.

6.1 Polymeerin valinta mikrosiiviläajoihin

Saostuskokeet laboratoriossa tehtiin ensin Kullaanvuoren puhdistamon jätevedellä (TSS 376 mg/L), jossa oli PIX:iä. Anionisten ja nonionisten polymeerien lisäyksellä sakka-
muodostumat olivat pienemmät kuin kationisilla polymeereillä. Kun näytteitä kaadettiin viiralle, kationisilla polymeereillä saostetut näytteet pidätyivät sen pinnalle paremmin kuin anionisilla ja nonionisilla polymeereillä saostetut näytteet. Näiden kokeiden perusteella valittiin viisi parasta kationista polymeeriä (Kemira) sekä kationinen Flopam (SNF Group), joille tehtiin saostuskokeet jätevedellä (TSS 277 mg/L), johon ei ollut lisätty PIX:iä ja polymeerilisäyksellä 2 mg/L (Kuva 11).



Kuva 11. Saostuskokeiden TSS-vähenemät kuudella eri polymeerillä 2 mg/L annostuksella ilman PIX-lisäystä ja PIX-lisäyksen kanssa.

PIX:iä sisältäneen jäteveden suurimmat TSS-vähenemät (93-96 %) olivat polymeereillä C-493VP, C-492HWP, C-494 ja C-494HWP. Ilman PIX-lisäystä polymeerit C-493VP, C-492HWP ja C-494HWP saostivat eniten TSS:ää (85-89 %). Eniten viiralle pidätyneet

näytteet sisälsivät polymeerejä C-492HMW, C-493VP ja C-494. Näiden perusteella mikrosiiviläkoeajoihin valittiin polymeerit C-492HMW ja C-493VP sekä Flopam.

6.2 Mikrosiivilöinnin massataseet

Tulevan veden TSS-pitoisuus oli 2203 ± 714 g/h ja COD-pitoisuus 4499 ± 631 g/h (Taulukko 13). Ilman polymeerilisäystä TSS-vähenemä oli 50 % ja COD-vähenemä 25 %. Flopam-lisäys 1 g/m^3 annostuksella ei nostanut TSS-vähenemää, mutta 2 g/m^3 :n annostuksella vähenemä oli 55-67 %, mikä on 10-34 % enemmän kuin ilman polymeeriä. Ajoissa, joihin lisättiin C-492HMW:ta ja C-493VP:ta TSS-vähenemät olivat noin 55 % riippumatta polymeeriannostuksesta. COD-vähenemät olivat kaikilla polymeereillä 27-43 % riippumatta polymeeriannostuksesta. Tämä on 8-72 % enemmän kuin ilman polymeeriä.

Taulukko 13. Koeajojen tulevan veden TSS- ja COD-pitoisuudet ja niiden poistumat mikrosiivilöinnissä. Kursivoidut lietteet ovat reaktorikokeisiin valittuja syötteitä.

	Tuleva virt, (m ³ /h)	Lähtevä virt, (m ³ /h)	Tuleva TSS (g/h)	TSS-poisto (g/h)	TSS-poisto (%)	Tuleva COD (g/h)	COD-poisto (g/h)	COD-poisto (%)
PIX, ei polymeeriä	7,8	7,8	3354	1646	49	4446	1263	28
<i>ei PIX, ei polymeeriä</i>	7,2	7,2	1969	984	50	4235	1055	25
PIX + Flopam 1 g/m^3	7,2	7,1	2657	1514	57	4811	1811	38
PIX + Flopam 1 g/m^3	7,6	7,6	2719	1590	58	4392	1354	31
ei PIX, Flopam 1 g/m^3	8,2	8,1	1976	960	49	5421	1836	34
<i>ei PIX, Flopam 2 g/m^3</i>	8,1	8,0	3591	1975	55	4938	2141	43
ei PIX, Flopam 2 g/m^3	7,6	7,5	1907	1279	67	4180	1227	29
ei PIX, C-492HMW 1 g/m^3	7,7	7,6	1232	702	57	3519	1464	42
ei PIX, C-492HMW 2 g/m^3	8,0	7,9	2453	1234	50	5739	1868	33
*ei PIX, C-492HMW 2 g/m^3	7,9	7,9	1803	773	43	4848	1630	34
<i>ei PIX, C-492HMW 2 g/m^3</i>	7,4	7,4	1901	1234	65	4157	1142	27
ei PIX, C-493VP 1 g/m^3	7,4	7,3	1346	742	55	3907	1470	38
ei PIX, C-493VP 2 g/m^3	7,8	7,8	1733	974	56	3892	1460	38

*: ajo jätetty huomioimatta ajon aikana ilmenneiden viiran ongelmien ja poikkeavien tulosten vuoksi.

Ravinteiden vähenemissä eri ajojen välillä oli vaihtelua (Taulukko 14). Myös tulevan veden ravinnepitoisuus vaihteli, mutta pitoisuudet olivat kuitenkin samaa suuruusluokkaa, joten tämä ei selitä poistotehon vaihtelua. PIX-lisäyksellä saadut tulokset on jätetty vertailusta pois, sillä PIX:iä sisältäneet lietenäytteet jätettiin pois reaktorikokeisiin valittavista lietteistä. PIX:iä sisältäviä lietteitä ei haluttu vertailuun, koska PIX saostaa jäteveden fosforia, joka päättyy lietteeseen ja edelleen biokaasuprosessin mädätteeseen. PIX:llä saostettu fosfori ei kuitenkaan ole helposti kasvien saatavilla, kun mädätteestä jalostetaan

lannoitevalmisteita. Kokonaistypen vähenemä oli 1-37 %. Kaikkien polymeerien kohdalla annostuksen nostaminen lisäsi typen poistoa. Esimerkiksi C-492HMW-polymeerillä TKN-vähenemä oli 0,4-0,5 % annostuksella 1 g/m³ ja 10 % annostuksella 2 g/m³. Suurin TKN-vähenemä (37 %) oli ajoissa, joissa käytettiin 2 g/m³ Flopam-polymeeriä. Yksittäisen ilman polymeerilisäystä tehdyn ajon TKN-vähenemä (29 %) oli 22 % vähemmän kuin parhaan polymeeriajon vähenemä.

Flopam-lisäyksellä tehdyissä koeajoissa annostuksen nosto nosti ammoniumtyppivähenemää 13:sta 16 %:iin. C-492HMW-polymeerilisäyksellä NH₄⁺-vähenemissä oli vaihtelua samallakin annostuksella. C-493VP:llä pienempi (1 g/m³) annostus poisti enemmän NH₄⁺:ää (13 %) kuin 2 g/m³:n annostus (2 %). Ilman polymeerilisäystä mikrosiivilän NH₄⁺-vähenemä oli 16 %, mikä on yhtä suuri kuin vähenemä 2 g/m³ Flopam-annostuksella.

Polymeerilisäys tehosti fosforin vähenemää erityisesti, kun käytettiin Flopam-polymeeriä. Ilman polymeeriä mikrosiivilän fosfori-vähenemä oli 11 %. Flopam-annostuksella 1 g/m³ TP-vähenemä oli 21 % (91 % suurempi kuin ilman polymeeriä) ja 2 g/m³ annostuksella 42 % (282 % suurempi). Polymeeriannostuksen nosto lisäsi TP-vähenemää myös C-492HMW- ja C-493VP-polymeereillä (21:stä 25 %:iin ja 13:sta 22 %:iin).

Ilman polymeeriä mikrosiivilä ei poistanut lainkaan fosfaattia. Myös pienillä polymeeriannostuksilla (1 g/m³) fosfaatin poisto oli vähäistä (alle 5 %). Polymeeriannoksen nosto 2 g/m³ lisäsi fosfaattivähenemää C-493VP:llä (2:sta 11 %:iin), mutta C-492HMW:llä suuremman annostuksen jälkeiset PO₄-vähenemät olivat -9 ja 8 %. Flopamilla PO₄-vähenemä nousi 50 %:iin polymeeriannoksella 2:een g/m³. Polymeerilisäys poisti lähes kaikissa tapauksissa ilman polymeeriä tehtyä ajoa enemmän ravinteita. Erityisesti Flopam-polymeeri lisäsi viiran ravinteiden poistoa.

Taulukko 14. Koeajojen tulevan veden typpi- ja fosforipitoisuudet ja niiden poistumat mikrosiivilöinnissä. Kursivoidut lietteet ovat reaktori-kokeisiin valittuja syötteitä.

	Tuleva virt, (m ³ /h)	Lähtevä virt, (m ³ /h)	Tuleva TKN (g/h)	TKN- poisto (g/h)	TKN- poisto (%)	Tuleva NH ₄ ⁺ (g/h)	NH ₄ ⁺ - poisto (g/h)	NH ₄ ⁺ - poisto (%)	Tuleva TP (g/h)	TP- poisto (g/h)	TP- poisto (%)	Tuleva PO ₄ (mg/h)	PO ₄ - poisto (mg/h)	PO ₄ - poisto (%)
PIX, ei polymeeriä	7,8	7,8	936	393	42	593	3	0,5	69	14	20	20	1,3	6
<i>ei PIX, ei polymeeriä</i>	7,2	7,2	507	146	29	474	77	16	46	5	11	24	-0,1	-0,2
PIX + Flopam 1 g/m ³	7,2	7,1	503	2,6	1	495	-19	-4	58	13	22	22	5,8	27
PIX + Flopam 1 g/m ³	7,6	7,6	459	1,8	0,4	479	67	14	40	8	20	11	-3,8	-36
ei PIX, Flopam 1 g/m ³	8,2	8,1	654	84	13	564	76	13	59	12	21	35	-0,3	-1
<i>ei PIX, Flopam 2 g/m³</i>	8,1	8,0	727	164	23	566	83	15	64	21	33	30	15	49
ei PIX, Flopam 2 g/m ³	7,6	7,5	833	306	37	363	62	17	60	30	51	39	19	50
ei PIX, C-492HMW 1 g/m ³	7,7	7,6	614	2,5	0,4	414	-14	-3	51	10	20	38	1,8	5
ei PIX, C-492HMW 2 g/m ³	8,0	7,9	479	2,2	0,5	508	127	25	45	10	21	22	-2,0	-9
*ei PIX, C-492HMW 2 g/m ³	7,9	7,9	635	4,1	1	302	-124	-41	40	-15	-36	22	-17	-78
<i>ei PIX, C-492HMW 2 g/m³</i>	7,4	7,4	742	77	10	534	10	2	59	15	25	34	2,6	8
ei PIX, C-493VP 1 g/m ³	7,4	7,3	516	-71	-14	390	52	13	37	5	13	26	0,5	2
ei PIX, C-493VP 2 g/m ³	7,8	7,8	781	4,1	1	555	11	2	55	12	22	38	4,2	11

*: ajo jätetty huomioimatta ajon aikana ilmenneiden viiran ongelmien ja poikkeavien tulosten vuoksi.

6.3 Mikrosiivilällä erotettujen lietteiden ominaisuudet

Koeajojen TSS- ja COD-vähenemät sekä koeajoissa erotettujen lietteiden metaanintuottopotentiaali ja ravinnepitoisuudet analysoitiin, minkä perusteella valittiin lietteet reaktoriin. Koeajot tehtiin virtaamalla 7,2-8,2 m³/h, ilman polymeeriä ja kolmella eri polymeerillä annostuksilla 1 ja 2 g/m³ (Taulukko 15).

Lietteentuotto kasvoi polymeereillä C-492HMW ja C-493VP, kun annostusta nostettiin 1:stä 2 g/m³:aan (31:stä 35 L/h:aan ja 37:stä 41 L/h:aan). Flopam-polymeerillä lietteentuotto oli 36-39 L/h. Viirakokeiden lietteentuotto laski (28 L/h:aan), kun ajoissa ei käytetty polymeerilisäystä. TS- ja VS-pitoisuudet (30 ja 26 g/L) lietteissä, joiden ajoissa ei ollut käytetty polymeerilisäystä olivat samat kuin ajoissa joissa oli käytetty polymeeriä. Keskimäärin polymeerilisäys nosti lietteen TKN-, NH₄⁺- ja TP-pitoisuuksia 27, 33 ja 21 %:lla verrattuna ajoihin, joissa ei käytetty polymeeriä. PO₄-pitoisuudet olivat alle 10 % pienempiä lietteissä, joiden mikrosiivilöinnissä oli käytetty polymeeriä. Flopam-, C-492HMW- ja C-493VP-annostusten nosto ei kasvattanut lietteiden TS-, VS- eikä ravinnepitoisuuksia.

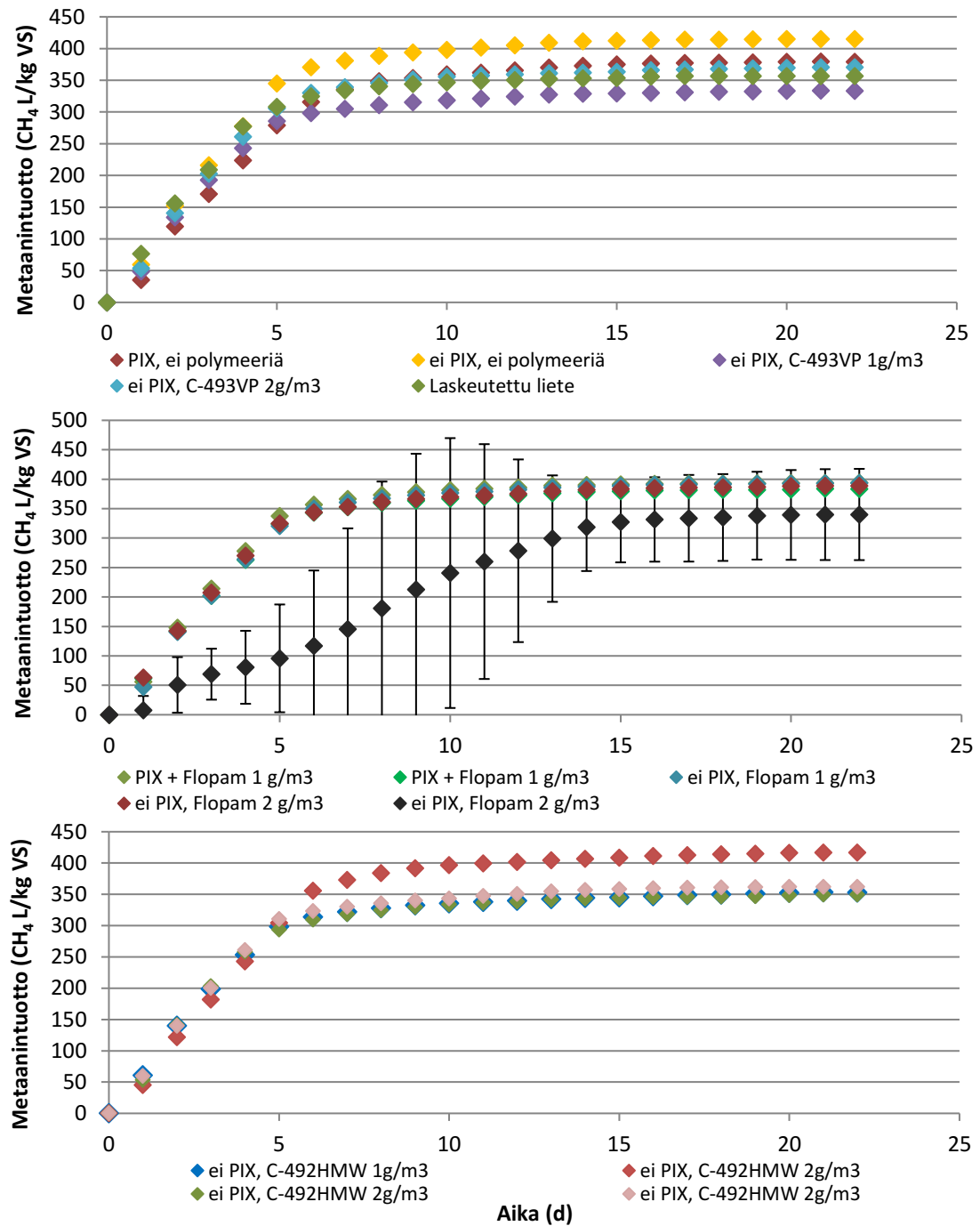
Kaikkien mikrosiivilälietteiden metaanintuotto panoskokeissa oli 333-416 L/kg VS. Metaanintuotossa oli vaihtelua samalla polymeerillä käsiteltyjen lietteiden välillä, eikä eri ajoparametreillä siivilöidyistä lietteistä mikään tuottanut selkeästi muita lietteitä enempää metaania. Flopam-annostuksella 1 g/m³ metaanintuotto oli 394 L/kg VS ja annostuksella 2 g/m³ 365 L/kg VS, mikä on 7 % vähemmän kuin pienemmällä annostuksella. C-493VP:llä metaanintuotto nousi polymeeriannostuksen noston jälkeen 11 % (333:stä 371 L/kg VS:aan). C-492HMW-polymeerillä annostuksen nosto 1:stä 2 g/m³:aan nosti metaanintuottoa 10 %:lla (353:sta 389 L/kg VS:aan). Ilman polymeeriä mikrosiivilöidyllä lietteellä metaanintuotto oli 415 L/kg VS.

Taulukko 15. Polymeerin, polymeeriannostuksen ja PIX-lisäyksen vaikutus TSS- ja COD-vähenemiin sekä lietteen määrään ja ravinnepitoisuuksiin mikrosiivilöidyillä jätevesillä, joihin ei ole lisätty PIX:iä. Kursivoidut lietteet ovat reaktorikokeisiin valittuja syötteitä. Keskihajonnat ovat suluissa.

Polymeeri ja annostus	PIX	Tuleva virtaama (m ³ /h)	Lietteen-tuotto (L/h)	Lietteen TS (g/L)	Lietteen VS (g/L)	Lietteen TKN (g/L)	Lietteen NH ₄ ⁺ (g/L)	Lietteen TP (g/L)	Lietteen PO ₄ (mg/L)	Lietteen CH ₄ -tuotto (L/kg VS)
ei polymeeriä	PIX	7,8	37,2	ei mitattu	ei mitattu	0,78	0,17	0,27	64	379 (51)
<i>ei polymeeriä</i>	-	7,2	27,7	30,0	26,1	0,79	0,15	0,19	59	415 (30)
Flopam 1 g/m ³	PIX	7,2	37,2	ei mitattu	ei mitattu	0,94	0,22	0,35	60	394 (51)
Flopam 1 g/m ³	PIX	7,7	30,4	30,1	26,0	0,86	0,17	0,24	66	383 (65)
Flopam 1 g/m ³	-	8,2	38,7	32,3	28,4	1,03	0,24	0,28	83	394 (31)
Flopam 2 g/m ³	-	7,6	38,7	27,2	22,6	1,09	0,17	0,18	59	340 (77)
<i>Flopam 2 g/m³</i>	-	8,1	36,0	27,1	23,0	0,89	0,19	0,22	53	389 (30)
C-492HMW 1 g/m ³	-	7,7	30,9	32,5	28,7	0,94	0,16	0,23	67	353 (57)
C-492HMW 2 g/m ³	-	8,0	36,0	27,9	21,3	0,94	0,25	0,21	22	416 (58)
*C-492HMW 2 g/m ³	-	7,9	51,5	26,2	22,6	0,83	0,16	0,18	70	350 (18)
<i>C-492HMW 2 g/m³</i>	-	7,4	34,6	35,5	29,2	1,21	0,16	0,23	46	362 (23)
C-493VP 1 g/m ³	-	7,4	36,9	31,7	27,2	0,92	0,17	0,23	54	333 (26)
C-493VP 2 g/m ³	-	7,8	41,1	30,4	26,0	1,02	0,22	0,23	48	371 (14)

- : PIX:iä ei lisätty ajoon, *: ajo jätetty huomioimatta ajon aikana ilmenneiden viiran ongelmien ja poikkeavien tulosten vuoksi

Metaanintuotto käynnistyi kaikilla lietteillä (yhtä Flopam-lietettä lukuun ottamatta) nopeasti panoskokeiden aloituksen jälkeen (Kuva 12). Metaanintuotto toisella Flopam-lietteellä (annostus 2 g/m³) lähti muita lietteitä hitaammin liikkeelle, mutta kasvoi vastaaviin lukemiin muiden lietteiden metaanintuottojen kanssa (340 L CH₄/kg VS). Lietteen rinnakkaisten pullojen kohdalla oli myös eroa, mikä aiheutti suuren keskihajonnan. Muiden lietteiden keskihajonta oli maksimissaan 139 L CH₄/kg VS.



Kuva 12. Mikrosiivilälietteiden metaanintuottopotentialit panoskokeissa. Tulok-
sista on vähennetty ympin metaanintuotto. Tulokset ovat keskiarvoja kolmesta
rinnakkaisesta panoskokeesta.

TSS- ja COD-vähenemien, ravinnetulosten ja BMP-kokeiden perusteella valittiin lietteet reaktorikokeisiin. TSS-vähenemä oli suurempi Flopam-polymeerillä 2 g/m³ annoksella tehdyissä ajoissa kuin 1 g/m³ annoksella tehdyissä ajoissa. Siksi suuremman Flopam-annoksen liete valittiin reaktorikokeisiin. Kun polymeerejä C-492HMW ja C-493VP lisättiin koeajoihin, ei annostuksilla eikä polymeereillä keskenään ollut suurta eroa. Myöskään metaanintuotot eivät eronneet merkittävästi toisistaan (2 g/m³ annoksella 389 L/kg VS C-492HMW:llä ja 371 L/kg VS C-493VP:llä). Koeajoihin valittiin Flopamin 2 g/m³ annostusta vastaava C-492HMW-polymeeri, virtaamalla 7,4 m³/h. Kaksi muuta samoilla ajo-parametreillä siivilöityä lietettä jätettiin pois reaktorikokeista, sillä niiden ajoissa oli ollut suurempaa vaihteluita tulevan jäteveden koostumuksessa ja viiran toiminnassa kuin muissa ajoissa.

Kahden polymeeriajon lisäksi reaktorikokeisiin valittiin vertailuun liete, jonka mikrosiivilöintiä ei tehostettu polymeerilisäyksellä. Tällä lietteellä saavutettiin korkein metaanintuotto panoskokeissa (415 L/kg VS). Kontrollilietteenä käytettiin laskeutettua lietettä, jotta voitiin vertailla reaktorikokeiden tuloksia esiselkeytettyyn lietteeseen.

6.4 Biokaasureaktorikokeiden tulokset

Reaktorikokeissa käytettiin syöteenä laskeutettua lietettä, mikrosiivilällä erotettua lietettä ja kahta lietettä, jotka oli saatu lisäämällä veteen polymeeriä ennen mikrosiivilöintiä (Taulukko 16).

Taulukko 16. Koeajoissa käytettyjen lietteiden TS-, VS- sekä ravinnepitoisuudet. Keskihajonta on suluisa.

Reaktori	Liete	TS (%)	VS (%)	VS/TS (%)	TKN (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	TP (mg/l)	PO ₄ liukoinen (mg/l)
	Ympäri	3,3	1,8	55	e.m.	e.m.	e.m.	e.m.
R1	Laskeutettu liete	2,8 (0,06)	2,5 (0,05)	89 (0,002)	760	140	145	57,9
R2	Viira ilman polymeeriä	3,2 (0,17)	2,8 (0,17)	89 (0,006)	800	150	187	58,8
R3	Viira + Flopam	2,8 (0,08)	2,5 (0,09)	87 (0,01)	890	190	218	58,5
R4	Viira + C-492HMW	3,3 (0,20)	2,7 (0,17)	83 (0,004)	1200	160	228	45,7

e.m.: ei mitattu

Reaktorikokeissa käytettyjen lietteiden VS-pitoisuus oli 2,5-2,8 %, minkä vuoksi samalla HRT:llä kuormitukset olivat lähellä toisiaan (Taulukko 12). Laskeutetun lietteen TP-pi-

toisuus oli 22-36 %:a pienempi kuin muiden lietteiden. Reaktori 4:n lietteen TKN-pitoisuus oli suurempi (310-440 mg/l) kuin muilla lietteillä ja fosfaattipitoisuus pienempi (noin 12 mg/l).

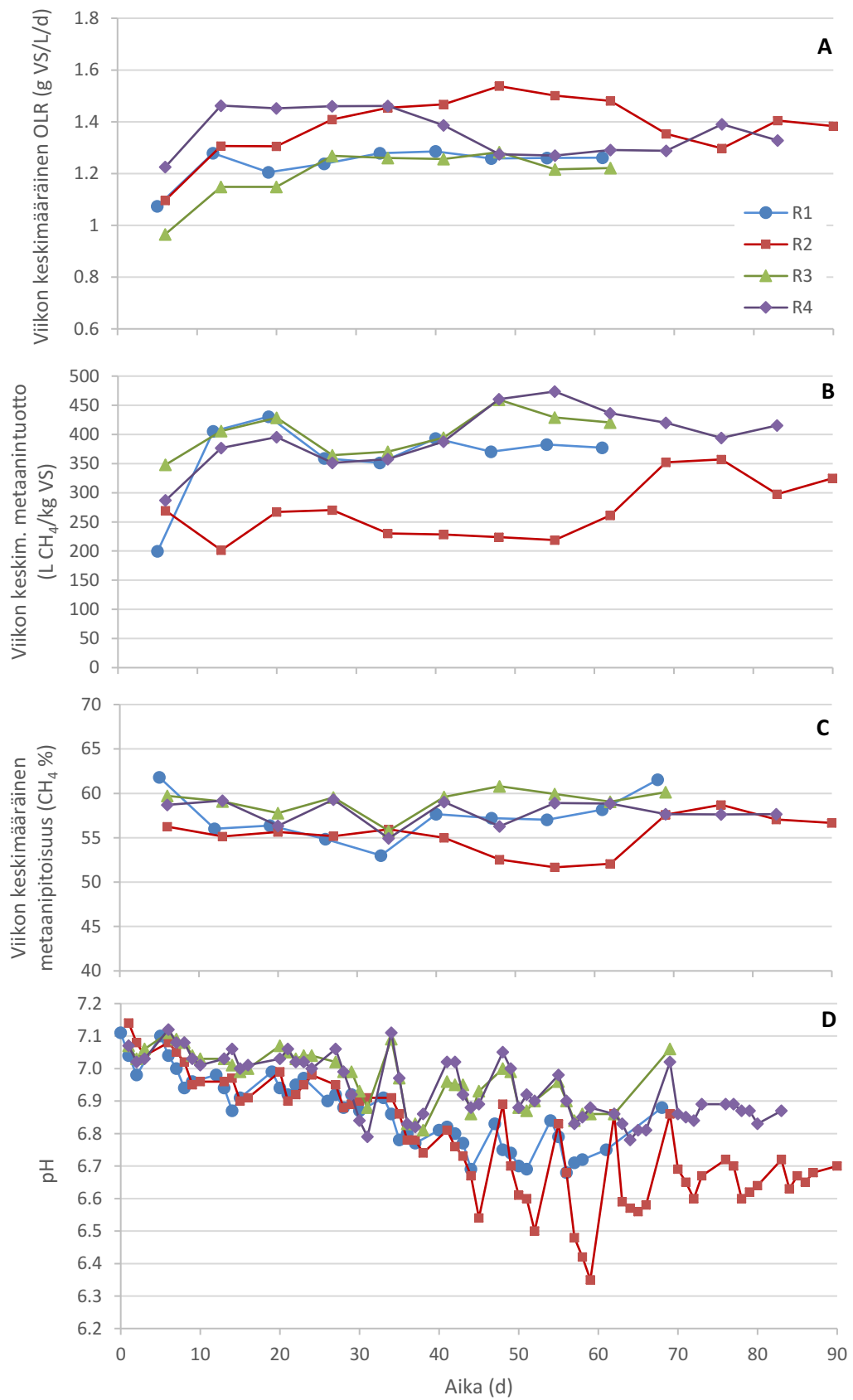
6.4.1 Metaanintuotto

Kaikissa reaktoreissa orgaaninen kuormitus oli 1,2-1,5 g VS/L/d (Kuva 13A). Reaktorissa 2 kuormitusta laskettiin (1,5:stä 1,4 g VS/L/d:aan) päivän 60 jälkeen, koska pH ja metaanintuotanto olivat olleet siihen saakka matalammalla kuin muissa reaktoreissa ja kuormitus oli noin 0,2 g VS/L/d suurempi.

Metaanintuotossa oli vaihtelua kaikissa reaktoreissa (Kuva 13B). Reaktoreissa 1, 3 ja 4 kaasuntuotto vaihteli viikon aikana niin, että viikon ensimmäisenä syöttöpäivänä saatiin yleensä suurin kaasuntuotto ja kolmantena päivänä pienin. Reaktorissa 2 kaasun tuotto oli suurimmillaan viikon viimeisenä syöttöpäivänä. Keskimääräinen metaanintuotto reaktorissa 1 oli 372 L CH₄/kg VS (Taulukko 17). Reaktoreissa 3 ja 4 metaanintuotto oli noin 6 % suurempi (406 ja 411 L CH₄/kg VS). Reaktorin 2 metaanintuotto oli keskimäärin 276 L CH₄/kg VS, mutta nousi päivän 61 jälkeen 333 L CH₄/kg VS, mikä on 10-19 % vähemmän kuin muissa reaktoreissa. Keskiarvot on laskettu ensimmäisen HRT:n jälkeen, kun kaikki ympäri on poistunut reaktorista.

Metaanipitoisuus laski viikon aikana, mutta nousi kuitenkin aina seuraavan viikon alkuun mennessä alkuperäiselle tasolle. Metaanipitoisuus kaikissa reaktoreissa oli viikkotasolla 51-62 % (Kuva 13C).

Reaktoreissa 1, 3 ja 4 pH laski tasaisesti päivään 44 asti ja reaktorissa 2 päivään 59 asti (Kuva 13D). Reaktorissa 2 pH oli alimmillaan 6,35:ssä. Laskun jälkeen kaikkien reaktorien pH:n viikkokeskiarvo tasaantui. Kaikissa reaktoreissa viikoittainen syöttötahti (5 päivää) vaikutti pH:hon niin, että viikon ensimmäisenä syöttöpäivänä pH oli korkeimmillaan, jonka jälkeen se laski tasaisesti viikon loppua kohden. Kahden päivän syöttötauon aikana pH nousi jopa kymmenyksiiä.



Kuva 13. CSTR-reaktorien orgaaninen kuormitus (A), metaanintuotto (B), metaanipitoisuus kaasussa (C) sekä pH (D) 62-90 ajopäivän aikana.

Reaktorien 1 ja 3 ajoajat olivat 62 päivää (Taulukko 17). Reaktorien 2 ja 4 ajoaikoja jatkettiin pidempään (90 ja 83 päivää). Metaanintuotto reaktorissa 1 oli 332 L/kg TS, 296 L/kg TS reaktorissa 2, 355 L/kg TS reaktorissa 3 ja 339 L/kg TS reaktorissa 4. Ilman polymeerilisäystä mikrosiivilöidyn lietteen metaanintuotto (reaktori 2) oli 13-17 % pienempi kuin lietteiden, jotka sisälsivät polymeeriä (reaktorit 3 ja 4).

Taulukko 17. *Lietteiden kuormitus sekä metaanintuotto reaktorikokeissa. Keskihajonta on sulussa. Reaktorin 2 (Viira ilman polymeeriä) tulokset on esitetty päivän 60 jälkeen, kun reaktorin kuormitusta laskettiin. Muissa reaktoreissa ensimmäinen HRT (20 d) on jätetty huomiotta, koska silloin reaktoreissa oli vielä ymppeä mukana.*

Reaktori	Laskeutettu liete	Viira ilman polymeeriä	Viira + Flopam	Viira + C-492HMW
Ajoaika (d)	62	90	62	83
OLR (g VS/L/d)	1,27 (0,02)	1,36 (0,05)	1,24 (0,05)	1,36 (0,08)
Metaanintuotto (m ³ CH ₄ /t VS)	372 (15)	333 (27)	406 (37)	411 (42)
Metaanintuotto (m ³ CH ₄ /t TS)	332 (14)	296 (23)	355 (32)	339 (35)
Metaanipitoisuus kaasussa (%)	57 (2,7)	58 (0,89)	59 (1,6)	58 (1,5)

6.4.2 Orgaanisen aineen vähenemä

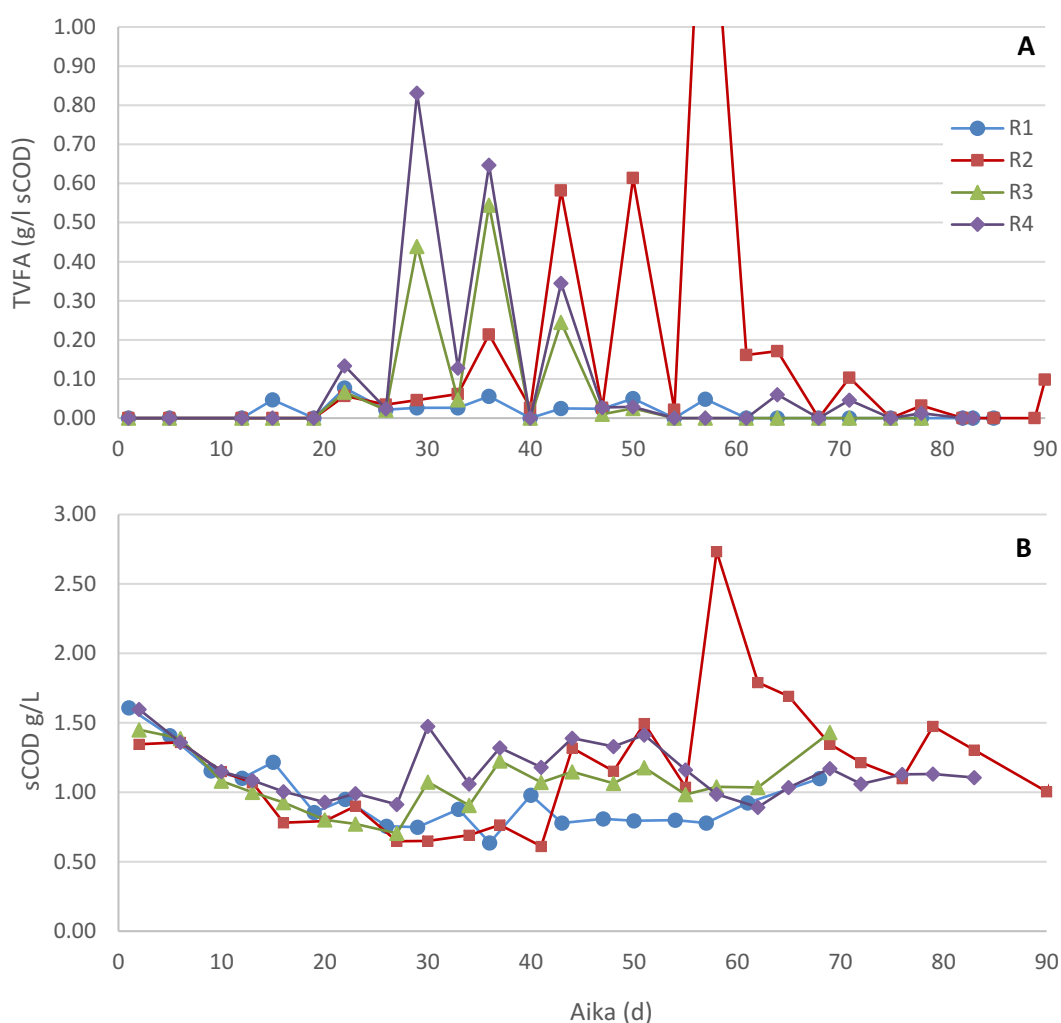
Reaktorikokeissa saavutettiin 63-73 %:n VS-vähenemä ja 55-68 %:n TS-vähenemä OLR:n ollessa alle 1,4 g VS/L/d (Taulukko 18). Aiemmissa tutkimuksissa yhdyskuntajätevedestä erotetun sekalietteen VS-vähenemä CSTR-reaktoreissa oli 45 % OLR:llä 2,5 g VS/L/d ja 52 % OLR:llä 1,56-2,09 g VS/L/d. (Davidsson et al. 2008; Luostarinen et al. 2009). Tässä kokeessa VS-vähenemät olivat keskimäärin 39 % suurempia kuin aiemmissa kokeissa sekalietteellä, mutta kuormitus oli (16-48 %) pienempi.

Taulukko 18. *Lietteiden TS- ja VS- vähenemät reaktorikokeissa. Keskihajonta on sulussa. Reaktorin 2 (Viira ilman polymeeriä) tulokset on esitetty päivän 60 jälkeen, kun reaktorin kuormitusta laskettiin. Muissa reaktoreissa ensimmäinen HRT (20 d) on jätetty huomiotta, koska silloin reaktoreissa oli vielä ymppeä mukana.*

Reaktori	Laskeutettu liete	Viira ilman polymeeriä	Viira + Flopam	Viira + C-492HMW
TS-vähenemä(%)	55 (12)	61 (4,2)	68 (15)	57 (14)
VS-vähenemä (%)	63 (8,1)	66 (4,4)	73 (13)	66 (12)

Haihtuvia rasvahappoja ei kertynyt reaktoreihin (Kuva 14A). Suurimmat reaktorien rasvahappopitoisuudet olivat viikon neljäntenä syöttöpäivänä, mutta pitoisuudet laskivat kahden syöttöttömän päivän aikana alle 0,2 g/L sCOD. Reaktorissa 2 VFA-pitoisuus kävi korkeimmillaan 1,6 g/L sCOD:ta päivänä 58, minkä jälkeen se ei enää noussut yli 0,2 g/L sCOD:ta. Yksittäisistä rasvahapoista propionaatti ja asetaatti muodostivat suurimman osan kaikkien reaktorien kokonais-VFA:sta.

Reaktorien 1, 3 ja 4 sCOD oli tasainen 0,5-1,5 g/L koko reaktorikokeiden ajan. Reaktorissa 2 sCOD-pitoisuus oli korkeimmillaan päivänä 58 (2,7 g/L), jolloin myös rasvahappopitoisuudet olivat korkeimmillaan ja pH matalimmillaan.

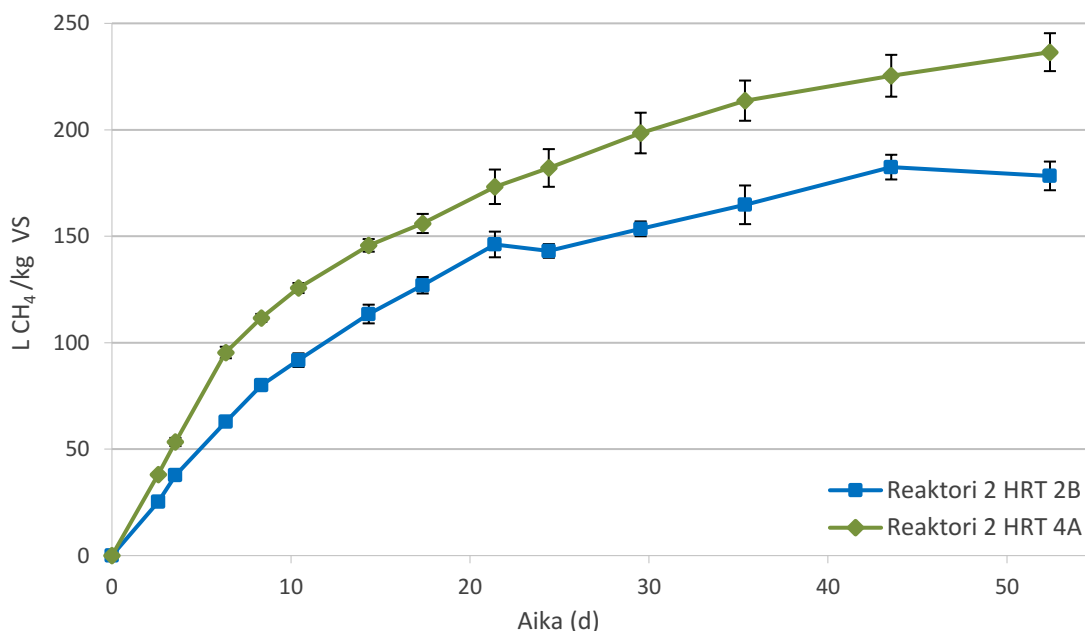


Kuva 14. CSTR-reaktorien kokonaisrasvahappojen ja liukoisen kemiallisen hapenkulutuksen pitoisuudet 62-90 ajopäivän aikana.

Reaktorien toiminta oli koko koeajojen ajan stabiilia (metaanintuotto oli tasaista ja VFA:ta eri kertynyt reaktoriin, jolloin pH pysyi myös tasaisena).

6.4.3 Reaktori 2:n jälkimetaanintuotto

Reaktorin 2 jälkimetaanintuottoa tutkittiin päiviltä 30-37, jolloin metaanintuotto reaktoreissa oli ollut heikkoa (218-230 L CH₄/t VS) ja päiviltä 61-70, jolloin se oli ollut korkeampaa (noin 350 L CH₄/t VS) (Kuva 15).



Kuva 15. Reaktori 2:n jälkimetaanintuotto päivien 30-37 (HRT 2B) mädätteistä ja päivien 61-70 (HRT 4A) mädätteistä.

Metaanintuotto mädätteelle päiviltä 30-37 oli 52 päivän panoskokeiden jälkeen 178 L/kg VS ja päivien 61-70 mädätteelle 236 L/kg VS. Ilman polymeeriä mikrosiivilöidyn lietteen kokonaismetaanintuotto päiviltä 30-37 oli 396-408 L/kg VS ja päiviltä 61-70 586 L/kg VS.

7. TULOSTEN TARKASTELU

Mikrosiiviläkokeen tuloksia ja metaanintuottoa vertaillaan aiempien mikrosiivilöintiä käsitelleiden tutkimusten tuloksiin. Mikrosiivilöintiä verrataan myös perinteiseen esiselkeytysmenetelmään, laskeutukseen. Lisäksi selvitetään polymeerilisäyksen vaikutuksia mikrosiivilöintiin ja metaanintuottoon.

7.1 Orgaanisen aineen poisto mikrosiivilällä

Kaikissa mikrosiivilöintituloksissa on otettava huomioon tulevan jäteveden koostumuksen vaihtelu. Koeajoja tehtiin ajoparametreilla, joissa vaihteli tulevan ravinne-, COD- ja TSS-pitoisuus sekä polymeeri ja polymeeriannostus. Suurimmasta osasta koeajoja on vain yksi ajo, joka on tehty tietyillä ajoparametreilla, joten tulokset ovat suuntaa antavia.

Mikrosiivilän toimintaa testattiin osassa ajoista ilman polymeeriä. Ilman PIX:iä tehdyssä ajossa saavutettiin 50 %:n TSS-vähenemä ja 25 %:n COD-vähenemä (Taulukko 19). Viiran kuormitus ($24,9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$) ajossa oli matala muissa tutkimuksissa ilman polymeeriä tehtyihin koeajoihin verrattuna (kuormitus jopa $200 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$), mutta TSS- ja COD-pitoisuudet tulevassa jätevedessä olivat lähellä aiempien tutkimusten keskiarvoa (294 ja 591 mg/L). Saavutetut TSS- ja COD-vähenemät olivat myös hyvin lähellä keskiarvoa (52 ja 29 %)

Rusten & Ødegaard (2006) havaitsivat laboratoriossa viiratesteissä, että kuormituksen nostaminen saattaa vähentää TSS-vähenemää. Täyden mittakaavan tutkimuksissa tätä ilmiötä ei kuitenkaan voitu suoraan osoittaa. TSS-vähenemään vaikuttaa myös tulevan jäteveden TSS-pitoisuus, veden pinnan korkeus mikrosiivilällä ja viiran huokoskoko sekä suodatuskakun muodostuminen, mitkä eivät olleet vakioita eri tutkimuksissa.

Taulukko 19. Ilman polymeeriä tehtyjen yhdyskuntajäteveden mikrosiivilääjojen tuloksia. Tämän tutkimuksen tulokset ovat yksittäisestä (ilman PIX-lisäystä tehdystä) ajosta.

Puhdistamo	Huokoskoko (µm)	Kuormitus (m ³ /m ² /h)	TSS tuleva (mg/L)	TSS-vähennä (%)	COD tuleva (mg/L)	COD-vähennä (%)
Tromssa, Norja ^a	350	25	331	90	e.i.	e.i.
Guldholmst-randa, Norja ^a	350	116	e.i.	78	e.i.	e.i.
Strømmen, Norja ^b	350	63	204	22	e.i.	19
Strømmen, Norja ^b	350	46	121	34	e.i.	24
Strømmen, Norja ^b	350	146	534	59	e.i.	39
Oslo, Norja ^c	33	20-24	185-375	41	391-650	31
Australia ^d	350		270-420	38	810	23
Blaricum, Hollanti ^e	350	200	242	50	441	35
Suomi, tämä tutkimus	210	24,9	273	50	588	25

e.i.: ei ilmoitettu, a (Rusten & Ødegaard 2006), b (Rusten et al. 2017), c (Rusten et al. 2016), d (Franchi & Santoro 2015), pienen mittakaavan tutkimus, e (Ruiken et al. 2013)

Suurimmassa osassa koeajoista käytettiin polymeerilisäystä esikäsittelyn tehostamiseksi (Taulukko 20). 1 g/m³:n polymeerilisäyksellä saavutettiin keskimäärin 53 %:n TSS-vähennä tässä tutkimuksessa, mikä oli keskimäärin 16 % pienempi kuin aikaisemmissa tutkimuksissa ja 6 % suurempi kuin tässä tutkimuksessa ilman polymeeriä. COD-vähennä oli 38 % tässä tutkimuksessa, mikä on 73 % enemmän kuin ilman polymeeriä.

Taulukko 20. Yhdyskuntajäteveden mikrosiiviläkokeissa 1 g/m³ polymeerilisäyksellä saavutetut TSS-vähennämät.

Puhdistamo	Polymeeri	Huokoskoko (µm)	Kuormitus (m ³ /m ² /h)	TSS tuleva (mg/L)	TSS-vähennä (%)
Bangsund, Norja ^a	Pemcat 163 -polymeeri (keskimääräinen kationivaraus, korkea molekyylipaino)	850, 250	25	e.i.	66
Ås, Norja ^b	Polyakryyliamidi (matala kationivaraus, korkea molekyylipaino)	250	41	e.i.	59
Suomi, tämä tutkimus	Flopam	210	28	241	47
Suomi, tämä tutkimus	C-492HMW, kationinen polymeeri	210	27	160	57
Suomi, tämä tutkimus	C-493VP, kationinen polymeeri	210	26	182	55

e.i.: ei ilmoitettu, a (Rusten & Ødegaard 2006), b (Rusten et al. 2017)

Kun polymeerilisäys nostettiin 2 g/m³:aan, TSS-vähennys nousi 1 g/m³:aan verrattuna keskimäärin 4 prosenttiyksikköä (57 %:iin) ja COD-vähennys laski keskimäärin 4 prosenttiyksikköä (34 %:iin) (Taulukko 21). Flopam-polymeerin kohdalla polymeeriannostuksen nosto laski TSS-vähennystä yli kymmenellä prosenttiyksiköllä, kun C-492HMW:n kohdalla polymeeriannostuksen nosto lisäsi TSS-vähennystä hieman (1 prosenttiyksiköllä). Aikaisempien tutkimuksissa 1 g/m³:n polymeeriannostuksella TSS-vähennys oli keskimäärin 63 % ja 2 g/m³:n polymeeriannostuksella 72 % eli polymeeriannostuksen nosto 1:stä 2 g/m³:aan näyttäisi lisäävän TSS-vähennystä (Rusten & Ødegaard 2006; Franchi & Santoro 2015; Rusten et al. 2017).

Taulukko 21. Yhdyskuntajäteveden mikrosiiviläkokeissa 2 g/m³ polymeerilisäyksellä saavutetut TSS-vähennykset.

Puhdistamo	Polymeeri	Huokos- koko (µm)	Kuormitus (m ³ /m ² /h)	TSS tuleva (mg/L)	TSS- vähennys (%)
Ås, Norja ^a	Polyakryyliamidi (matala kationivaraus, korkea molekyylipaino)	350	43	e.i.	70
Australia ^b	kationinen polymeeri	350	e.i.	270-420	72
Australia ^b	kationinen polymeeri	250	e.i.	270-420	74
Suomi, tämä tutkimus	Flopam	210	27	347	61
Suomi, tämä tutkimus	Flopam	210	52	246	47
Suomi, tämä tutkimus	C-492HMW, kationinen polymeeri	210	27	281	58
Suomi, tämä tutkimus	C-492HMW, kationinen polymeeri	210	48	296	61
Suomi, tämä tutkimus	C-493VP, kationinen polymeeri	210	28	230	56

e.i.: ei ilmoitettu, a (Rusten et al. 2017), b (Franchi & Santoro 2015)

Polymeerilisäyksellä voidaan lisätä TSS:n että COD:n vähennyksiä, mikä on huomattu myös aikaisemmissa tutkimuksissa. Tässä tutkimuksessa TSS-vähennykset eivät olleet yhtä suuria kuin aikaisemmissa tutkimuksissa, joissa oli käytetty vastaavia määriä polymeeriä. Aikaisemmissa tutkimuksissa käytetyt polymeerit ovat saattaneet flokata paremmin jäteveden kiintoainetta tai ajo-olosuhteita on optimoitu kohti isompaa poistotehokkuutta, minkä ansiosta suurempiin poistoihin on päästy. Aikaisempien tutkimusten perusteella korkea nestepinta viiralla ja hidas viiran pyörimisnopeus (1 m/min) ovat lisänneet TSS:n vähennystä (Rusten et al. 2017). Toisaalta myös pienellä viiran kuormituksella on päästy korkeisiin (90 %) TSS-vähennyksiin (Rusten & Ødegaard 2006). Optimaalisten ajo-

olosuhteiden selvittäminen vaatisi vielä lisätutkimuksia. Kationinen C-492HMW näyttäisi poistavan molemmilla polymeeriannostuksilla enemmän TSS:ää kuin kaksi muuta koeajoissa käytettyä polymeeriä.

Esiselkeytyks poistaa 50-70 % TSS:stä ja 30-40 % COD:sta (Rössle & Pretorius 2001; Ramadori et al. 2005; Metcalf & Eddy 2014). Näissä mikrosiiviläkokeissa keskimääräiset vähenemät (55 %:n TSS-vähenemä ja 35 %:n COD-vähenemä), ovat samaa luokkaa kuin perinteisessä esiselkeytyksessä. Vaikka näissä mikrosiivilöintikokeissa ei päästytkään yhtä korkeisiin kiinteän ja orgaanisen aineen poistoihin, kuin aikaisemmissa kokeissa, tämä ei välttämättä ole ongelma. Jäteveden esikäsittelyssä on kuitenkin huomioitava, että orgaanista ainetta on jäätävä myös biologiseen typen poistoon (Paulsrud et al. 2014; Rusten et al. 2016).

Perinteisellä laskeutuksella on päästy 9-20 %:n TP- ja TKN-vähenemiin. Mikrosiiviläkokeissa ravinnevähenemät (erityisesti typen) vaihtelivat paljon myös samoilla ajoparametreilla tehdyissä ajoissa (Taulukko 22). Polymeerin lisäys lisäsi kuitenkin kokonaisfosforin ja fosfaatin vähenemää verrattuna ilman polymeeriä tehtyyn mikrosiivilöintiin.

Taulukko 22. Ilman PLX-lisäystä tehtyjen ajojen ravinnevähenemät ilman polymeeriä ja polymeeriannostuksilla 1 ja 2 g/m³. Keskihajonnat suluissa.

	TKN- vähenemä (%)	NH ₄ ⁺ - vähenemä (%)	TP- vähenemä (%)	PO ₄ - vähenemä (%)
ei polymeeriä	29	16	11	-0.2
Flopam	24 (12)	15 (2)	35 (15)	33 (29)
C-492HMW	3,6 (5,5)	8 (15)	22 (2,6)	1,3 (9,1)
C-493VP	-6,5 (10,6)	7,5 (7,8)	18 (6,4)	6,5 (6,4)

7.2 Biokaasureaktorikokeet

Suosittelun reaktorin maksimi-OLR 20 päivän HRT:llä ja 3-4 % VS-pitoisuudella on 1,1-1,4 kg VS/m³/d (Metcalf & Eddy 2014). Reaktorien kuormitukset pysyivät pääosin alle 1,4 VS/m³/d tässä tutkimuksessa, mutta reaktori 2:n kuormitus oli kahden viikon ajan korkeimmillaan yli 1,5 VS/m³/d. Tällöin myös metaanintuotto ja pH olivat alhaisimmillaan, mikä saattaa kuvata liian suurta reaktorin kuormitusta. Kuormituksen laskemisen jälkeen reaktorin pH tasaantui ja metaanintuotto nousi noin 230:sta 333 L CH₄/kg VS:aan. Näiden reaktorikokeiden perusteella alhaisella orgaanisella kuormituksella reaktorien toiminta pysyy tasaisena, eikä VFA:ta tai sCOD:ta ala kertyä reaktoreihin. Myös pH pysyy lähellä 7:ää ja metaanintuotto on tasaista.

Panoskokeista poiketen metaanintuotto lietteissä näytti kasvavan reaktorikokeissa polymeerilisäyksen ansiosta jopa 20 % verrattuna polymeerittömään mikrosiivilöintiin (Taulukko 23). Aikaisemmissa tutkimuksissa metaanintuotto oli 49-86 % suurempi lietteille,

joiden esikäsittelyssä oli käytetty polymeeriä. Flopam- ja C-492HMW-polymeerien keskimääräiset metaanintuotot olivat lähes samat.

Taulukko 23. Laskeuttamalla ja mikrosiivilöimällä saatujen lietteiden metaanintuotopotentiaalit. Suluissa oleva tuotto kertoo BMP-kokeiden tuloksen.

Liete	TS (%)	VS (%)	Metaanintuotto (L CH ₄ /kg VS)	Polymeeri
Laskeutettu primääriliete, Norja ^a	2,7	2,2	(259-325)	ei
Laskeutettu liete, Suomi, tämä tutkimus	2,8	2,5	372 (357)	ei
Mikrosiivilöity liete, Norja ^a	27,3	25	(323-366)	ei
Mikrosiivilöity liete, Suomi, tämä tutkimus	3,2	2,8	333 (416)	ei
Mikrosiivilöity liete, Norja ^b	6	5,2	(483)	matala kationivaraus, Polyakryyliamidi, 0,9-1,8 mg/L
Mikrosiivilöity liete, Suomi, tämä tutkimus	2,8	2,5	406 (389)	Flopam, 2 mg/L
Mikrosiivilöity liete, Suomi, tämä tutkimus	3,3	2,7	411 (361)	C-492HMW, kationinen poly- meeri, 2 mg/L

a (Paulsrud et al. 2014), b (Rusten et al. 2017)

Laskeutetun lietteen metaanintuotto (372 L CH₄/kg VS) tämän tutkimuksen reaktorikokeissa ylitti aikaisemman tutkimuksen laskeutetun lietteen metaanintuotopotentiaalin, sekä tässä ja aiemmissa tutkimuksissa tehtyjen mikrosiivilälietteiden metaanintuotopotentiaalin. Ilman polymeeriä tehtyjen mikrosiivilälietteiden BMP-kokeissa päästiin korkeampaan metaanintuottoon (416 L CH₄/kg VS) kuin aiemmassa Paulrud et al. (2014) tutkimuksessa (323-366 L CH₄/kg VS). Reaktorikokeissa metaanintuotto jäi alemmas (333 L CH₄/kg VS) kuin BMP-kokeissa, jolloin orgaanista ainetta jäi hajoamatta reaktorissa. Muihin lietteisiin verrattuna tulos oli erilainen, sillä muiden lietteiden kohdalla suurempi osuus orgaanisesta aineesta hajosi biokaasureaktoreissa kuin panoskokeissa.

Metaanintuottotulokset ovat erilaisia, sillä aikaisempien tutkimusten tulosten perusteella odotettiin, että pelkällä mikrosiivilöinnillä saavutetaan korkeampi metaanintuotto kuin laskeutuksella. Tämä voi johtua mikrosiivilöidyn lietteen suuremmasta VS-pitoisuudesta (92 % TS:stä) verrattuna laskeutettuun lietteeseen (81 % TS:stä). (Paulsrud et al. 2014) Näin ei kuitenkaan käynyt, vaan ilman polymeerilisäystä mikrosiivilöidyn lietteen metaanintuotto jäi yli 100 L CH₄/kg VS laskeutetun lietteen metaanintuotosta. On mahdollista, että mikrosiivilöity liete sisältää laskeutettua lietettä enemmän selluloosaa, joka on peräisin yhdyskuntajäteveden selluloosasta. Ruiken et al. (2013) tutkivat primäärilietteitä ja havaitsivat, että mikrosiivilällä erotettu primääriliete saattaa sisältää jopa 79 % selluloosaa (40 prosenttiyksikköä enemmän kuin laskeutettu liete). Selluloosa on hitaasti hydrolysoituvaa, minkä takia se ei välttämättä hajonnut kokonaan reaktorissa (Ruiken et al.

2013). Toisaalta polymeeriä sisältäneen mikrosiivilälietteet tuottivat laskeutettua lietettä enemmän metaania (34-39 L/kg VS). Tämä on noin 350 MWh vuodessa eli 18:n sähkölämmitteisen omakotitalon sähkönkulutuksen verran (Vattenfall). Polymeerin ansiosta lietteeseen on saattanut sitoutua selluloosan lisäksi myös pienempiä, helpommin hajoavia partikkeleita, jolloin metaanin tuotto on tehostunut (Rusten et al. 2017).

Ilman polymeeriä mikrosiivilöidyn lietteen metaanintuotto päivinä 30-37 oli matalampaa (218-230 L CH₄/t VS) kuin päivinä 61-70 (noin 350 L CH₄/t VS). Näiden päivien lietteille tehtiin jälkimetaanintuottokokeet, koska haluttiin nähdä tuottaisiko 30-37 päivien mädäte enemmän metaania kuin päivien 61-70 mädäte. Oletus oli, että orgaaninen aine ei hajonnut yhtä tehokkaasti reaktoreissa päivinä 30-37 kuin päivinä 61-70, jolloin päivien 30-37 lietteen jälkimetaanintuotto olisi korkeampi. Päivien 61-70 liete tuotti kuitenkin edelleen enemmän metaania (236 L/kg VS verrattuna 178 L/kg VS), eikä selkeää syytä tälle löydetty. Ilman polymeeriä mikrosiivilöidyn lietteen kokonaismetaanintuotto (metaanintuotto reaktoreissa ja jälkimetaanintuotto) päiviltä 30-37 oli 396-408 L/kg VS ja päiviltä 61-70 586 L/kg VS (44-48 % enemmän kuin päivinä 30-37).

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Koeajoissa Nokian Kullaanvuoren jätevedenpuhdistamoilla testattiin mikrosiivilän toimintaa esikäsittelylaitteistona. Jäteveden virtaama koeajoissa oli keskimäärin $7,7 \text{ m}^3/\text{h}$ ja kuormitus $27 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$.

Ilman PIX-lisäystä ja polymeerilisäyksellä mikrosiivilöimällä päästiin keskimäärin 57 % TSS-vähennykseen ja 36 % COD-vähennykseen, mitkä ovat samaa suuruusluokkaa kuin perinteisellä laskeutuksella. Myös fosforia ja typpeä poistui jätevedestä vastaavia määriä kuin laskeutuksella. Ilman PIX- ja polymeerilisäystä vähennykset olivat matalampia, kuin polymeerilisäyksellä (TSS-vähennys 50 % ja COD-vähennys 25 %).

Mikrosiivilällä erotetun lietteen VS-vähennys reaktoreissa oli 63-73 % kuormituksella $1,24\text{-}1,36 \text{ g VS/L/d}$. Biokaasureaktorien metaanintuotto oli tasaista ja rasvahappopitoisuus mädätteessä oli matala (alle $0,2 \text{ g/L sCOD}$).

Mikrosiivilällä ilman polymeerilisäystä tuotetun lietteen metaanintuotto oli pienempi (333 L/kg VS) kuin laskeutetun lietteen metaanintuotto (372 L/kg VS). Kun jäteveteen lisättiin polymeeriä ennen mikrosiivilöintiä, lietteen metaanintuotto oli $406\text{-}411 \text{ L CH}_4/\text{kg VS}$, mikä oli $34\text{-}39 \text{ L/kg VS}$ suurempi kuin laskeutetun lietteen.

Tämän tutkimuksen perusteella virtaamalla $7,7 \text{ m}^3/\text{h}$ ja mikrosiivilän suotopinta-alalla $0,290 \text{ m}^2$ mikrosiivilää voitaisiin käyttää esikäsittelyprosessina yhdyskuntajätevedenpuhdistamolla. Kiintoainevähennyksen ja metaanintuoton kasvattamiseksi tulevaan jäteveteen voitaisiin lisätä polymeeriä ennen mikrosiivilöintiä. Mikrosiivilöintiin soveltuisi 2 g/m^3 annostuksella polymeeri Flopam tai C-492HMW, sillä molempien kiintoainevähennykset (61 ja 58 %) ja metaanintuotot (406 ja 411 L/kg VS) olivat tässä tutkimuksessa lähes samat. Mikrosiiviläliete näyttäisi soveltuvan myös metaanin tuotantoon.

LÄHTEET

- Appels, L., Baeyens, J., Degrevé, J. & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34(6), s. 755-781.
- Bouzas, A., Gabaldón, C., Marzal, P., Peña-roja, J. M. & Seco A. (2002). Fermentation of Municipal Primary Sludge: Effect of Srt and Solids Concentration on Volatile Fatty Acid Production, *Environmental Technology*, Vol. 23, s. 863-575
- Bratby, J. (2006). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, 2nd ed., IWA Publishing, 400 s.
- Chu, C.P., Lee, D.J., Chang, B., You, C.H., Liao, C.S. & Tay, J.H. (2003). Anaerobic digestion of polyelectrolyte flocculated waste activated sludge, *Chemosphere*, Vol. 53(7), s. 757-764.
- Davidsson, Å, Lövestedt, C., la Cour Jansen, J., Gruvberger, C. & Aspegren, H. (2008). Co-digestion of grease trap sludge and sewage sludge, *Waste Management*, Vol. 28(6), s. 986-992.
- Euroopan komissio. (2015). Kierto kuntoon - Kiertotaloutta koskeva EU:n toimintasuunnitelma. 22 s. Saatavissa (viitattu 3.10.2017): http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0013.02/DOC_1&format=PDF.
- FCG Finnish Consulting Group. (2011). Pirkanmaan keskuspuhdistamo, Sulkavuoren vaihtoehto: Ympäristövaikutusten arviointiselostus. 80 s.
- Franchi, A. & Santoro, D. (2015). Current status of the rotating belt filtration (RBF) technology for municipal wastewater treatment, *Water Practice and Technology*, Vol. 10(2), s. 319-327.
- Gernaey, K.V. & Jørgensen, S.B. (2004). Benchmarking combined biological phosphorus and nitrogen removal wastewater treatment processes, *Control Engineering Practice*, Vol. 12(3), s. 357-373.
- GKD - Gebr. Kufferath AG (2015). Filter media: It's all in the mix: wire mesh as composite mesh, *Filtration + Separation*, Vol. 52(5), s. 44-45.
- Hu, Z., Chandran, K., Smets, B.F. & Grasso, D. (2002). Evaluation of a rapid physical-chemical method for the determination of extant soluble COD, *Water Research*, Vol. 36(3), s. 617-624.

- Jimenez, J., Grelier, P., Meinhold, J. & Tazi-Pain, A. (2010). Biological modelling of MBR and impact of primary sedimentation, *Desalination*, Vol. 250(2), s. 562-567.
- Kim, J. & Chung, J. (2014). Implementing chemical precipitation as a pretreatment for phosphorus removal in membrane bioreactor-based municipal wastewater treatment plants, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18(4), s. 956-963.
- Larsen, T.A., Udert, K.M. & Lienert, J. (2013). *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*, IWA Publishing, Ashland, 483 s.
- Lin, L., Li, R., Li, Y., Xu, J. & Li, X. (2017). Recovery of organic carbon and phosphorus from wastewater by Fe-enhanced primary sedimentation and sludge fermentation, *Process Biochemistry*, Vol. 54(Supplement C), s. 135-139.
- Ljunggren, M. (2006). Micro screening in wastewater treatment – an overview, *Vatten*, Vol. 62, s. 171-177.
- Luostarinen, S., Luste, S. & Sillanpää, M. (2009). Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant, *Bioresource Technology*, Vol. 100(1), s. 79-85.
- Mackenzie L. D. (2010). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*, McGraw-Hill Education, New York.
- Marañón, E., Negral, L., Fernández-Nava, Y. & Castrillón, L. (2013). Influence of conditioning agents and enzymic hydrolysis on the biochemical methane potential of sewage sludge, *Water Science & Technology*, Vol. 68(7), s. 1622-1632.
- Metcalf & Eddy (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*, McGraw-Hill Education, New York, 2018 s.
- Mönkäre, T., Kinnunen, V., Tampio, E., Ervasti, S., Lehtonen, E., Kettunen, R., Rasi, S., Rintala, J. (2016) *Ravinnevisio: Selvitys Pirkanmaan puhdistamolietteiden ja biojätteiden ravinteista ja niiden potentiaalisesta käytöstä*, Pirkanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, Raportteja 74, 55 s.
- Nedjah, N., Hamdaoui, O. & Laskri, N. (2015). Phosphorus Removal of Urban Wastewater by Physico- Chemical Treatment: Waterways Eutrophication Prevention, *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 6(6), s. 435-438.
- Nieuwenhuijzen, A.F.v. (2002). *Scenario Studies into Advanced Particle Removal in the Physical-Chemical Pre-treatment of Wastewater*, 256 s.
- Nieuwenhuijzen, A.F.v., Graaf, J.H.v.d., Kampschreur, M.J. & Mels, A.R. (2004). Particle related fractionation and characterisation of municipal wastewater, *Water Science & Technology*, Vol. 50(12), s. 125-132.

Nokian vesi. (2017). Viemärlaitoksen tekniset tiedot. Saatavissa (viitattu 25.7.2017): <http://www.nokianvesi.fi/toiminta/viemarilaitoksen-tekniset-tiedot/>

Pasztor, I., Thury, P. & Pulai, J. (2009). Chemical oxygen demand fractions of municipal wastewater for modeling of wastewater treatment, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 6(1), s. 51-56.

Paulsrud, B., Rusten, B. & Aas, B. (2014). Increasing the sludge energy potential of wastewater treatment plants by introducing fine mesh sieves for primary treatment, *Water Science & Technology*, Vol. 69(3), s. 560-565.

Poon, C.S. & Chu, C.W. (1999). The use of ferric chloride and anionic polymer in the chemically assisted primary sedimentation process, *Chemosphere*, Vol. 39(10), s. 1573-1582.

Ramadori, R., Marani, D., Renzi, V., Passino, R. & DiPinto, A.C. (2005). Rethinking sewage treatment by enhancing primary settling with low-dosage lime, *Water Science & Technology*, Vol. 52(10-11), s. 185-192.

Ravazzini, A.M., van Nieuwenhuijzen, A.F. & van der Graaf, J.H.M.J. (2005). Direct ultrafiltration of municipal wastewater: comparison between filtration of raw sewage and primary clarifier effluent, *Desalination*, Vol. 178(1), s. 51-62.

Razafimanantsoa, V.A., Ydstebø, L., Bilstad, T., Sahu, A.K. & Rusten, B. (2014). Effect of selective organic fractions on denitrification rates using Salsnes Filter as primary treatment, *Water Science & Technology*, Vol. 69(9), s. 1942-1948.

Roeleveld, P.J. & Loosdrecht, v.M.C.M. (2002). Experience with guidelines for wastewater characterisation in The Netherlands, *Water Science & Technology*, Vol. 45(6), s. 77-87.

Rudelle, E., Vollertsen, J., Hvitved-Jacobsen, T. & Nielsen, A.H. (2011). Anaerobic transformations of organic matter in collection systems, *Water Environment Research*, Vol. 83(6), s. 532-540.

Ruiken, C.J., Breuer, G., Klaversma, E., Santiago, T. & van Loosdrecht, M.C.M. (2013). Sieving wastewater – Cellulose recovery, economic and energy evaluation, *Water Research*, Vol. 47(1), s. 43-48.

Rusten, B., Rathnaweera, S.S., Rismyhr, E., Sahu, A.K. & Ntiako, J. (2017). Rotating belt sieves for primary treatment, chemically enhanced primary treatment and secondary solids separation, *Water Science & Technology*, Vol. 75(11), s. 2598-2606.

Rusten, B., Razafimanantsoa, V.A., Andriamiarinjaka, M.A., Otis, C.L., Sahu, A.K. & Bilstad, T. (2016). Impact of fine mesh sieve primary treatment on nitrogen removal in moving bed biofilm reactors, *Water Science & Technology*, Vol. 73(2), s. 337-344.

Rusten, B. & Ødegaard, H. (2006). Evaluation and testing of fine mesh sieve technologies for primary treatment of municipal wastewater, *Water Science & Technology*, Vol. 54(10), s. 31-38.

Rössle, W.H. & Pretorius, W.A. (2001). A review of characterisation requirements for in-line prefermenters paper 1: Wastewater characterisation, Water SA, Vol. 27(3), s. 405-412.

Salsnes Filter AS. (2016). Salsnes Filter Eco-Efficient Solids Separation, 10 s. Saatavissa (viitattu 26.7.2017): http://www.salsnes-filter.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/01/salsnes-detailer_2016_lr.pdf

Salsnes Filter SMART-Plant Wastewater Pilot Projects: Salsnes Filter at the Forefront of Resource Recovery, Salsnes Filter. Saatavissa (viitattu 26.7.2017): <http://www.salsnes-filter.com/2017/05/08/smart-plant-wastewater-pilot-projects-salsnes-filter-at-the-forefront-of-resource-recovery/>.

SFS 3008. 1990. Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäännöksen määrittäminen, Vesi- ja ympäristöhallitus, 2. painos, 3 s.

SFS 5504. 1988. Veden kemiallisen hapen kulutuksen (COD_{Cr}) määrittäminen suljetulla putkimenetelmällä. Hapetus dikromaatilla, Vesi- ja ympäristöhallitus, 4 s.

SFS-EN 872. Veden laatu. Kiintoaineen määrittäminen. Suodatus lasikuitusuodattimella, Suomen ympäristökeskus, 15 s.

Sincero, A.P. & Sincero, G.A. (2003). Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater, CRC Press, 832 s.

Sophonsiri, C. & Morgenroth, E. (2004). Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal, industrial, and agricultural wastewaters, Chemosphere, Vol. 55(5), s. 691-703.

Tas, D.O., Karahan, Ö, Insel, G., Övez, S., Orhon, D. & Spanjers, H. (2009). Biodegradability and Denitrification Potential of Settleable Chemical Oxygen Demand in Domestic Wastewater, Water Environment Research, Vol. 81(7), s. 715-727.

Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesisistä. (2006). 888/2006. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060888>.

Vattenfall. Kodin sähkönkulutus. Saatavissa (viitattu 25.9.2017): <https://www.vattenfall.fi/energianeuvoonta/sahkonkulutus/>

Vilpanen, M. & Toivikko, S. (2017). Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus, Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 46, 38 s.

Virta, J. & Pylsy, P. (2011). Taloyhtiön energiakirja, Kiinteistöalan kustannus oy, Sitran julkaisusarja, 192 s.

Väänänen, J., Cimbritz, M. & la Cour Jansen, J. (2016). Microsieving in primary treatment: effect of chemical dosing, *Water Science & Technology*, Vol. 74(2), s. 438-447.

Väänänen, J. (2017). Microsieving in municipal wastewater treatment: Chemically enhanced primary and tertiary treatment, Vol. Department of Chemical Engineering, Lund Universitypp. 52 s.

Wang, H., Li, F., Keller, A.A. & Xu, R. (2009). Chemically enhanced primary treatment (CEPT) for removal of carbon and nutrients from municipal wastewater treatment plants: A case study of shanghai, *Water Science and Technology*, Vol. 60(7), s. 1803-1809.

Wei, W., Zhou, X., Xie, G., Duan, H. & Wang, Q. (2017). A novel free ammonia based pretreatment technology to enhance anaerobic methane production from primary sludge, *Biotechnology and bioengineering*, Vol. 114(10), s. 2245-2252.

Wellinger, A., Murphy, J. & Baxter, D. (2013). *The Biogas Handbook*, Elsevier Science, Cambridge, 476 s.

Xu, S. & Hultman, B. (1996). Experiences in wastewater characterization and model calibration for the activated sludge process, *Water Science and Technology*, Vol. 33(12), s. 89-98.

Yhdyskuntajätevesien käsittelyä koskeva direktiivi (1991). 91/271/ETY. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0271&from=EN>.

Ylä-Outinen, A. (2014). Metsäteollisuuden lietteiden metaanintuotto ja sen tehostaminen, Tampereen teknillinen yliopisto, 54 s.

Yoshida, H., Christensen, T.H., Guildal, T. & Scheutz, C. (2015). A comprehensive substance flow analysis of a municipal wastewater and sludge treatment plant, *Chemosphere*, Vol. 138, s. 874-882.

Ødegaard, H. (1998). Optimised particle separation in the primary step of wastewater treatment, *Water Science & Technology*, Vol. 37(10), s. 43-53.